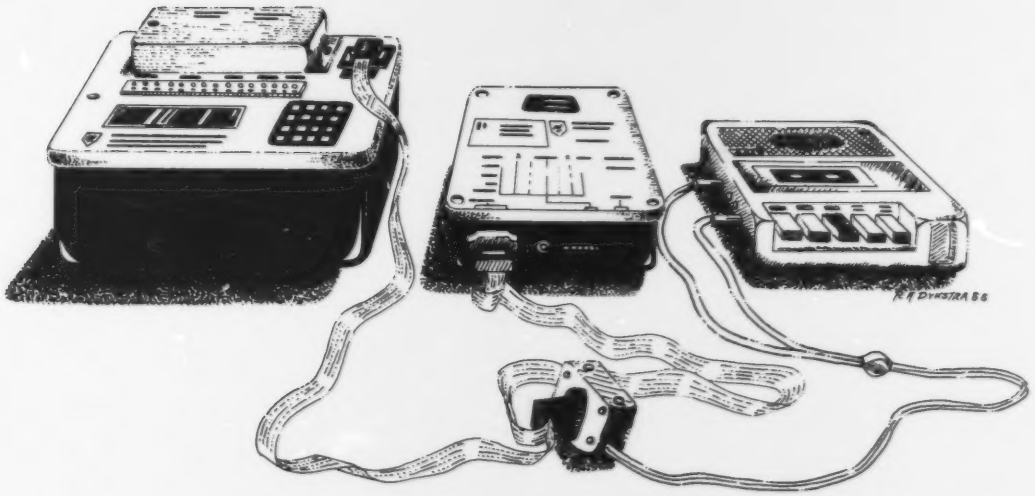
Forêts Canada Forestry Canada

Utilisation de consignateurs de données pour la surveillance environnementale en recherche forestière : vue d'ensemble et étude de cas

D.G. Brand, M.D. Flannigan et P.S. Janas

Rapport d'information PI-X-81F
Institut forestier national de Petawawa



INSTITUT FORESTIER NATIONAL DE PETAWAWA

Le mandat de l'Institut forestier national de Petawawa, comme celui des autres établissements du Forêts Canada, est de promouvoir une meilleure gestion et une utilisation plus rationnelle des ressources forestières du Canada, pour le bien économique et social de tous les Canadiens. Les objectifs des activités des programmes menés à l'Institut appuient ce mandat à travers la découverte, le développement, la démonstration, l'application et le transfert des innovations. En tant qu'institut national, il doit s'attacher à des problèmes qui débordent le cadre régional ou qui nécessitent des compétences particulières de même qu'un équipement non disponible aux installations régionales du Forêts Canada. La plupart du temps, ses recherches sont effectuées en étroite collaboration avec le personnel des centres régionaux, des services forestiers des provinces et de l'industrie forestière.

Les projets de recherche et les services techniques de l'Institut sont regroupés sous cinq principales activités:

GÉNÉTIQUE FORESTIÈRE ET BIOTECHNOLOGIE — Ce programme encadre des projets sur la génétique forestière, la microbiologie, la micropropagation, la génétique moléculaire et la recherche sur les semences. Il comprend également les services à la clientèle et la banque de semences du Centre national de semences forestières. Ce centre existe depuis longtemps et est lié à plusieurs organismes internationaux.

SYSTÈMES D'AMÉNAGEMENT FORESTIER — Ce programme intègre en recherche et développement, des projets sur les incendies de forêt, la télédétection, la météorologie, la modélisation, la croissance et la récolte, et le RIMA. Il permet ainsi l'élaboration et la démonstration de systèmes d'aménagement forestier.

STATISTIQUES NATIONALES SUR LES RESSOURCES FORESTIÈRES — Ce programme fournit l'information biologique, technique et socio-économique sur les ressources forestières du Canada. Il vise le développement des bases de données et l'établissement de nouveaux logiciels et bases de données pour aider à l'élaboration des politiques forestières. Le Programme d'inventaire forestier recueille l'information sur les forêts au niveau national, maintient le Système sur les ressources forestières canadiennes, et prépare l'inventaire des forêts du Canada.

COMMUNICATIONS — Ce programme regroupe les activités de la bibliothèque et des projets touchant la sensibilisation du public, l'information, la rédaction-révision et les publications. L'Institut reçoit plus de 20 000 visiteurs chaque année. Le Centre d'accueil, des visites autoguidées et un programme éducatif complet sont ouverts à tous. C'est à l'IFNP que l'on trouve l'entrepôt et le centre de distribution nationals de toutes les publications scientifiques du Forêts Canada.

LA FORÊT EXPÉRIMENTALE — Outre des peuplements naturels où l'on applique divers traitements dans le cadre de projets de recherche en sylviculture, la Forêt de Petawawa, mesurant 100 km^2, comprend de vastes superficies de plantations âgées de plus de 60 ans. Ces plantations expérimentales permettent d'obtenir des données sur la croissance et la récolte à la suite d'expériences de culture. Elles fournissent du matériel génétique dont le lignage est répertorié, et se révèlent de plus en plus utiles pour les études sur la micropropagation et la génétique moléculaire. La forêt permet également de mettre à l'essai des stratégies d'aménagement forestier à court et à long termes.

UTILISATION DE CONSIGNATEURS DE DONNÉES POUR LA SURVEILLANCE ENVIRONNEMENTALE EN RECHERCHE FORESTIÈRE : VUE D'ENSEMBLE ET ÉTUDE DE CAS

D.G. Brand, M.D. Flannigan et P.S. Janas

Rapport d'information PI-X-81F
Institut forestier national de Petawawa
Forêts Canada
1989

90-00228/

©Ministre des Approvisionnements et Services Canada, 1989
N° de catalogue Fo46-11/81-1988F
ISBN 0-662-95371-1
ISSN 0228-0736

Il est possible d'obtenir sans frais des exemplaires de cette publication auprès du/de:

Centre d'information technique et de distribution
Institut forestier national de Petawawa
Chalk River (Ontario)
K0J 1J0

N° de téléphone: 613-589-2880

Des copies ou microfiches de cette publication sont en vente chez:

Micromédia Ltée
Place du Portage
165, rue Hôtel-de-Ville
Hull (Québec)
J8X 3X2

This publication is also available in English under the title **Using datalogger systems for environmental monitoring in forest research: an overview and case study.**

Nous ne cautionnons aucune marque de commerce mentionnée dans le présent rapport. Les noms de produit sont donnés seulement à titre d'exemples. Des produits concurrents peuvent exister.

Table des matières

v Résumé/Abstract

1 I. Introduction

1 II. Conception d'un programme de surveillance environnementale

4 III. Choix d'un consignateur de données

4 A. Généralités
5 B. Caractéristiques du matériel

5 B.1 Canaux d'entrée analogiques
5 B.2 Canaux de comptage numériques
6 B.3 Sorties de tension numériques ou analogiques
6 B.4 Enregistrement du temps
6 B.5 Protection
7 B.6 Caractéristiques et conditions de fonctionnement
7 B.7 Alimentation en électricité
7 B.8 Communications/Mémorisation des données

8 C. Affichage des données et programmation

8 IV. Types d'instruments météorologiques pouvant être facilement utilisés avec les consignateurs de données

8 A. Capteurs de rayonnement solaire

8 A.1 Pyranomètre et radiomètre solaire
9 A.2 Capteurs quantiques

10 B. Capteurs de température
11 C. Capteurs d'humidité relative
11 D. Capteurs de potentiel d'humidité du sol

12 D.1 Capteurs à résistance électrique
13 D.2 Tensiomètres
13 D.3 Psychromètres à thermocouple

13 E. Pluviomètres
14 F. Capteurs de vitesse et de direction du vent

15 V. Installation d'un consignateur de données à l'Institut forestier national de Petawawa (lac Cartier) : Étude de cas

15 A. Introduction
15 B. Description de l'expérience
17 C. Types de capteurs et disposition
18 D. Gestion des données
19 E. Protection du système
19 F. Récupération des données et problèmes

21 Conclusions

21 Remerciements

22 Références

25 Annexe 1: Liste des fabricants de consignateurs de données en Amérique du Nord
28 Annexe 2: Éléments du système de consignation de données utilisé dans la plantation expérimentale du lac Cartier

RÉSUMÉ

Il s'agit d'un guide d'initiation au processus de surveillance des conditions environnementales à l'aide de consignateurs de données automatiques qui s'adresse aux chercheurs forestiers. Le rapport aborde différents aspects du dispositif expérimental (quoi, où, comment et quand mesurer), du devis technique et de la gestion de programmes de recherche en surveillance environnementale. L'étude de cas d'une importante installation comportant la surveillance constante de 92 senseurs est utilisée pour démontrer les méthodes de conception, d'exploitation et de gestion des données dans le cadre d'un projet de recherche. La collecte automatique de données à l'aide de capteurs environnementaux accroît la capacité des chercheurs forestiers de quantifier les conditions et d'expliquer leurs effets secondaires sur les résultats. Il faut cependant bien choisir les variables à mesurer, le matériel, les senseurs et les périphériques et avoir une installation et un système de protection appropriés ainsi qu'une bonne gestion des données.

ABSTRACT

This is an introduction for forest researchers to the monitoring of environmental conditions with automatic data loggers. The report discusses various aspects of the experimental design (definition of what, where, how, and when to measure), the technological design, and the management of environmental monitoring research programs. A case study of a large field installation with continuous monitoring of 92 sensors is used to demonstrate the design, operation, and management of data from a research project. Automatic data collection with environmental sensors increases the ability of forest researchers to quantify conditions and explain secondary influences on results. Care must be taken, however, in proper selection of variables to measures; choice of hardware, sensors, and peripherals; correct installation and system protection; and effective data management.

UTILISATION DE CONSIGNATEURS DE DONNÉES POUR LA SURVEILLANCE ENVIRONNEMENTALE EN RECHERCHE FORESTIÈRE : VUE D'ENSEMBLE ET ÉTUDE DE CAS

I. Introduction

Les progrès réalisés dans les domaines des puces électroniques et des circuits d'ordinateur au cours de la dernière décennie ont popularisé les enregistreurs de donnés portatifs et peu coûteux. On trouve deux types d'instrument sur le marché, tous les deux permettant le stockage et le transfert de grandes quantités de données dans des ordinateurs individuels sans avoir à réentrer et vérifier les données. Le premier type, appellé «carnet électronique» est conçu pour remplacer crayons et feuilles de pointage ou d'entrée de données. Les appareils suivants entrent dans cette catégorie : Husky Hunter, Omnidata Polycorder, Dap Microflex et Digitech Memo. L'autre catégorie comprend les instruments appelés «consignateurs de données»[1] tels que le Campbell Scientific Micrologger, le système d'acquisition de données à accès multiple Handar, l'Omnidata Easy Logger et le Wescor Delta logger. Contrairement aux «carnets électroniques», ces instruments enregistrent les données fournies par des capteurs extérieurs et, normalement, ne permettent pas à l'utilisateur d'entrer directement ses données. Les consignateurs de données sont polyvalents et ils sont utilisés dans de nombreux domaines : industrie, systèmes de sécurité, diagnostics automobiles, surveillance environnementale ou météorologique. Le présent rapport traite de l'emploi des consignateurs de données en surveillance environnementale.

L'emploi de consignateurs de données automatiques pour surveiller les conditions environnementales en recherche forestière est de plus en plus répandu partout dans le monde. Les consignateurs de données peuvent contrôler de façon continue divers capteurs microclimatiques installés dans des endroits éloignés et, s'ils sont correctement mis en place, ils ne requièrent généralement qu'un entretien minime. Malheureusement, les utilisateurs éventuels connaissent souvent mal les capacités et les exigences de ces systèmes et, devant le nombre croissant d'appareils disponibles, il leur est parfois difficile de déterminer le modèle qui leur convient. L'utilisateur, même s'il a déjà choisi le fabricant, doit s'assurer que le système (y compris les capteurs nécessaires) répond bien à ses besoins, en plus d'être rentable.

Le présent rapport est destiné aux chercheurs forestiers qui prévoient utiliser ou qui viennent de commencer à utiliser des consignateurs de données dans leurs travaux de recherche. Nous examinerons les aspects biologiques d'un programme de surveillance environnementale, le matériel et les logiciels utilisés dans les consignateurs de données ainsi que les types de capteurs météorologiques couramment employés. Plutôt que de présenter une description exhaustive des capteurs et de la surveillance environnementale, nous nous limiterons aux applications forestières et nous présenterons une étude de cas relative à une expérience où sont utilisés plusieurs types de capteurs. Nous espérons que, malgré la diversité toujours croissante des consignateurs de données et des capteurs, le présent rapport aidera le chercheur à concevoir un programme de surveillance dans lequel la technologie sera adaptée aux objectifs expérimentaux.

II. Conception d'un programme de surveillance environnementale

Le chercheur dispose maintenant de la technologie nécessaire pour surveiller les conditions environnementales et stocker automatiquement les données. Toutefois, pour satisfaire les objectifs d'une étude, les données recueillies doivent présenter certaines caractéristiques relatives au type, à l'exactitude, à la précision et à la fréquence des mesures. Cela est particulièrement important pour le chercheur forestier qui, sans être un expert en micrométéorologie, a besoin de données environnementales pour mener à bien ses études de croissance ou ses études physiologiques. En outre, dans ces études, il est souvent nécessaire de disposer d'une gamme de paramètres environnementaux parmi lesquels on doit choisir quoi

[1] Dans le présent rapport, le terme «consignateur de données» s'applique aussi aux appareils appelés couramment «plates-formes de collecte de données». Une plate-forme de collecte de données est un système de consignation de données dans lequel les communications se font par satellite.

mesurer, où et à quel moment. Nous allons maintenant chercher à préciser certains éléments de réponse à ces questions.

Klebs (1913) fut le premier à proposer une relation entre les caractéristiques génétiques d'une plante, l'environnement, la physiologie de la plante et sa croissance. Selon lui, la constitution génétique d'une plante, influencée par l'environnement, commande les processus physiologiques qui, à leur tour, déterminent la croissance. Le principe de l'influence environnementale a été étudié plus en détail par Mason et Langenheim (1957) puis par Spomer (1973). Ces chercheurs considèrent que le contact entre les plantes et l'environnement se fait par l'intermédiaire d'un transfert d'énergie et de matériaux (eau, éléments nutritifs, rayonnement photosynthétiquement utilisable, etc.). Ces transferts sont déterminés par les conditions environnementales (force de rétention de l'eau du sol, température du sol, densité de flux photonique, etc.). Dans l'étude de l'environnement de la plante, nous nous intéressons aux conditions qui influent sur le transfert de ces ressources car ce sont ces conditions qui déterminent l'état de stress environnemental (au sens de Levitt, 1972).

Les chercheurs qui désirent quantifier les différences entre plusieurs sites, ou les résultats d'un traitement sylvicole, doivent choisir parmi les conditions environnementales celles qui sont importantes. Dans la majorité des cas, les conditions environnementales ne sont pas indépendantes et, partant, un seul traitement peut influer sur un grand nombre de variables. Par exemple, le scarifiage peut influer sur la température du sol, sur la force de rétention de l'eau du sol et, par le biais d'une réduction de la compétition, sur l'intensité lumineuse. Dans la surveillance environnementale, mesurer les paramètres environnementaux nous permet de mieux comprendre pourquoi un certain traitement est plus ou moins efficace sur un type de site donné ou pourquoi un traitement qui améliore un paramètre ne réussit pas à améliorer la croissance des arbres. Les notions de stress environnemental et de réponse de croissance de l'arbre sont interdépendantes. L'environnement influe sur l'arbre, mais c'est la réponse de l'arbre qui détermine si les conditions environnementales sont stressantes ou non.

Le choix des conditions environnementales à contrôler est déterminé par la connaissance préalable du système, par la nature des hypothèses étudiées et aussi par le coût. En général, les ressources environnementales importantes sont l'énergie, l'humidité et les éléments nutritifs. D'autres ressources telles que le CO_2 n'influent généralement pas suffisamment sur la croissance des arbres pour justifier une surveillance. La quantité d'énergie que les plantes peuvent recevoir dépend de la densité de flux photonique photosynthétique ainsi que de la température du sol et de l'air. Le stress hydrique est fonction à la fois de la quantité d'eau disponible (par ex., la force de rétention de l'eau du sol) et de la demande atmosphérique (par ex., humidité relative ou déficit de pression de vapeur). L'apport en éléments nutritifs, moins facile à mesurer directement, peut être considéré comme une densité de flux d'éléments nutritifs vers la racine de la plante (Ingestad et coll. 1981).

Les conditions environnementales qui influent directement sur la plante sont souvent déterminées par les caractéristiques du site. Par exemple, la force de rétention de l'eau du sol dépend de la pente, de l'exposition, de la roche-mère et des précipitations. La température du sol est fonction de la capacité thermique, de la conductibilité thermique et du rayonnement incident. La disponibilité en éléments nutritifs dépend de l'importance des réserves, du pH et de l'activité biologique. Certaines de ces variables peuvent être quantifiées par dosage, d'autres à l'aide de capteurs.

Après avoir défini les conditions environnementales à mesurer, le chercheur doit déterminer comment mesurer les variables, où les mesurer et à quelle fréquence. Un grand nombre de variables requièrent seulement une mesure. C'est le cas des variables statiques telles que la texture, la roche-mère ou l'exposition. Néanmoins, la plupart des conditions environnementales sont dynamiques et divers types de capteurs ont été mis au point pour enregistrer les variations. En général, étant donné que les plantes occupent un espace où les conditions environnementales sont souvent variables, il est important de décider où les mesures doivent être effectuées. Dans le cas de dispositifs expérimentaux ou pour la surveillance systématique de différents sites, le chercheur doit déterminer à la fois la variation à l'intérieur d'un

site ou d'un traitement et les variations entre différents sites et différents traitements.

En terrain irrégulier, la température du sol au printemps peut être fortement liée au microsite. L'interception de la lumière par la végétation concurrente peut aussi varier considérablement sur de courtes distances. Pour tenir compte de la variabilité environnementale à l'intérieur d'un site, on peut augmenter le nombre de capteurs ou effectuer des analyses de régression avec des données plus facilement mesurables. Par exemple, on peut estimer l'intensité lumineuse autour d'un arbre échantillon en utilisant un indice de compétition étalonné à l'aide d'une sonde lumineuse (Brand et Janas, 1988). Il est important que tous les traitements ou tous les sites soient contrôlés de la même façon pour les comparer entre eux.

Certaines variables environnementales peuvent être mesurées en accord avec des méthodes et des normes existantes. Si l'on a besoin de données standard telles que la température de l'air, le point de rosée ou l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent, on adoptera les méthodes de mesure préconisées par l'Organisation météorologique mondiale (1983). Si les mesures sont utilisées pour étalonner un modèle, il convient de spécifier l'emplacement des capteurs (par ex., température du sol à une profondeur donnée), mais, le plus souvent, on cherchera à caractériser une condition moyenne ou à définir une gamme de conditions.

Plusieurs règles pratiques et générales sont à notre disposition lorsqu'il n'existe pas de méthodes ou de normes appropriées. Pour l'interception de la lumière, la meilleure méthode consiste à mesurer le rayonnement simultanément au-dessus et au-dessous du couvert végétal. La température du sol et la force de rétention de l'eau du sol doivent être mesurées en des emplacements représentatifs (en évitant les soulèvements ou les cuvettes) à une profondeur de sol minéral donnée, tel au milieu de la zone de racines, ou à différentes profondeurs représentant toute la zone de racines. La force de rétention de l'eau du sol, en particulier, aura des valeurs différentes à différentes profondeur, l'assèchement ayant tendance à suivre un «front» à mesure que l'on descend dans le sol. Ainsi, un capteur à 5 cm de profondeur peut indiquer - 3,0 MPa alors qu'un autre capteur à 30 cm indiquera - 0,05 MPa.

La fréquence de contrôle d'un paramètre donné dépend de sa variabilité temporelle. Par exemple, la température du sol à une certaine profondeur et la force de rétention de l'eau du sol varient très lentement sur une période de quelques jours alors que l'intensité lumineuse, l'humidité relative et les conditions à la surface du sol subissent de fortes variations diurnes. La vitesse et la direction du vent, quant à elles, varient constamment. Un contrôle peu fréquent peut conduire à des erreurs car la plupart des capteurs ne répondent pas instantanément à des changements environnementaux. Plus exactement, les capteurs possèdent une constante de temps (vitesse de réponse) (Fritschen et Gay, 1979) généralement indiquée dans les spécifications. Tanner (1963) suggère un intervalle de lecture égal à deux fois la constante de temps, mais, pour un grand nombre de capteurs possédant des constantes de temps très courtes (par ex., les capteurs quantiques), cette fréquence peut excéder la capacité du consignateur de données. En général, avec les consignateurs de données automatiques, il est facile de recueillir des mesures fréquentes et de calculer une moyenne, plutôt que d'effectuer des mesures très espacées et de perdre de l'information.

Enfin, il convient de déterminer quelles doivent être l'exactitude (comparaison avec la valeur vraie) et la précision (variabilité autour d'une moyenne) des mesures. À cet égard, il faut tenir compte de l'effet de l'erreur sur l'interprétation des données. Par exemple, la mesure de la force de rétention de l'eau du sol en recherche forestière a tendance à être plus critique lorsqu'une plus grande quantité d'eau est disponible. Une erreur de 0,05 MPa peut alors avoir des conséquences importantes. Par contre, avec des forces de rétention plus élevées, l'exactitude est moins importante: l'interprétation est peu différente si la tension est de -2,0 MPa au lieu de -2,1 MPa (le sol est sec et les racines ne peuvent pas croître). Les erreurs dues à des méthodes de contrôle inadéquates ou négligentes sont plus importantes et plus facilement évitables (par ex., fluctuation de température aux points de jonction d'un thermocouple, perturbation du sol autour des capteurs ou protection inadéquate pour les capteurs de température de l'air ou d'humidité). Les guides d'utilisation de la plupart des capteurs contiennent une description raisonnablement

détaillée des limites de l'appareil et l'on doit généralement faire un compromis entre l'exactitude et le prix.

III. Choix d'un consignateur de données

A. Généralités

Avant de choisir parmi plusieurs consignateurs de données, il convient de bien connaître les exigences de leurs systèmes de contrôle de données. Voici les principaux types de caractéristiques et de restrictions à envisager:

1) quantité et type de données requises; précision et exactitude désirées;

2) nombre et types de capteurs nécessaires pour recueillir les données ci-dessus et emplacements relatifs approximatifs sur le site de recherche;

3) emplacement sur le terrain pour la collecte de données;

4) fréquence de collecte des données requise;

5) installation de calcul disponible;

6) contraintes en matière de coût.

Lorsqu'il examine les exigences relatives aux données, l'utilisateur doit d'abord considérer la plage prévue de valeurs pendant la durée de fonctionnement. Dans certains cas, il sera nécessaire d'utiliser plus d'un type de capteur pour enregistrer les données avec exactitude sur une plage donnée. Par exemple, il est préférable d'utiliser des tensiomètres pour mesurer la teneur en eau des sols très humides alors qu'avec des sols secs, les psychromètres ou les blocs à résistance donnent de meilleurs résultats.

Il est nécessaire de connaître le nombre et le type de capteurs qui seront utilisés pour déterminer le nombre de canaux d'entrée (analogiques) et de sortie (excitation) que devra posséder le consignateur de données. Certains consignateurs de données sont dotés de prolongateurs de canaux, ou multiplexeurs, qui permettent d'accroître le nombre de canaux disponibles pour l'entrée des données. Les multiplexeurs permettent aussi de réduire les coûts et la longueur des câbles de connexion avec les capteurs. Dans certains cas, il est même possible d'économiser sur les capteurs eux-mêmes si les multiplexeurs comportent des composants électriques qui peuvent remplacer ceux que l'on trouve sur les capteurs individuels (par ex., certains blocs de gypse). Toutefois, même avec un nombre suffisant de canaux, il se peut que le consignateur de données puisse être connecté à un nombre limité de capteurs. Il convient de connaître les positions relatives des capteurs pour déterminer combien de multiplexeurs sont nécessaires et si le programme du consignateur de données peut prendre en charge une telle séquence de mesures.

La plupart des fabricants de consignateurs de données offrent aussi divers capteurs utilisables avec leurs enregistreurs. Il est bon de vérifier la compatibilité des capteurs non approuvés auprès du fabricant.

Si l'on a besoin d'un type unique de capteur, il se peut qu'il existe un consignateur de données spécialisé capable de traiter les mesures. En général, ces consignateurs de données sont fabriqués par l'entreprise qui fournit les capteurs. Par exemple, le Delta Logger (Wescor Inc.) enregistre, met en mémoire et transfère les données physiologiques fournies par un tensiomètre compatible. Ces consignateurs de données présentent l'avantage d'avoir été conçus pour fonctionner avec des capteurs spécialisés et pour fournir des données fiables et précises. Les consignateurs de données spécialisés sont souvent plus faciles à installer et à programmer. Ils coûtent aussi moins cher que les consignateurs de données polyvalents.

Un grand nombre de fabricants offrent des consignateurs de données modulaires. Ces appareils peuvent être connectés à un nombre indéterminé de capteurs et ils ont été conçus pour répondre aux besoins d'un grand groupe d'utilisateurs ou d'utilisateurs nécessitant un grand nombre de consignateurs de données. La plupart de ces consignateurs modulaires sont destinés à la surveillance opérationnelle, mais ils peuvent aussi être utilisés en recherche.

La fréquence d'échantillonnage possible varie avec chaque consignateur de données et est limitée par le nombre de capteurs contrôlés. Si le

système comporte un grand nombre d'instruments, le temps nécessaire pour parcourir tous les capteurs peut être trop long pour permettre de réaliser les mesures avec la fréquence voulue. On perd alors des données. L'utilisateur doit décider de la fréquence d'échantillonnage appropriée en se fondant sur des facteurs tels que la variabilité prévue des lectures des capteurs, le nombre d'instruments de même sorte utilisés pour un traitement expérimental donné et la précision des valeurs expérimentales désirée.

L'utilisateur doit aussi considérer la variation diurne prévue des paramètres mesurés avant de déterminer la fréquence de balayage de chaque capteur (c'est-à-dire la fréquence d'échantillonnage) et s'il convient de faire la moyenne de ces mesures sur une période de temps donnée. Par exemple, pour un paramètre relativement stable tel que la température du sol à une profondeur de quelques décimètres, une seule mesure par jour peut suffire, sans calcul de moyenne supplémentaire. Par contre, pour mesurer un paramètre tel que la vitesse du vent qui varie constamment, l'utilisateur peut choisir un intervalle d'échantillonnage de 10 s, avec un calcul de moyenne toutes les 15 min. Il convient de noter qu'un échantillonnage fréquent peut entraîner un épuisement rapide de la batterie.

Il est nécessaire de connaître la fréquence d'échantillonnage et les périodes de calcul de moyenne pour déterminer le nombre de données qui seront conservées respectivement dans la mémoire initiale et dans la mémoire finale du consignateur de données. La mémoire disponible dépend du nombre de multiplets alloués à chaque point de données, ainsi que du nombre de données. Le nombre de multiplets par point de donnée peut varier suivant le consignateur de données utilisé ainsi que suivant la précision des données (nombre de chiffres enregistrés). Certaines expériences peuvent exiger une très grande précision, par exemple lorsqu'une faible différence dans la mesure a un effet important sur le paramètre mesuré ou lorsque le paramètre mesuré varie peu en fonction du temps. Le fabricant doit indiquer le nombre de multiplets par point de données afin que l'utilisateur puisse calculer le nombre de données qu'il pourra mettre en mémoire.

B. Caractéristiques du matériel

Lorsqu'on choisit un consignateur de données, il convient de considérer les aspects décrits ci-dessous. La plupart des fabricants fournissent des spécifications relatives à ces caractéristiques.

B.1 Canaux d'entrée analogiques

Le nombre de canaux disponibles pour le branchement de capteurs est important lorsque l'expérience requiert un grand nombre de capteurs. Si le nombre de canaux est insuffisant, l'utilisateur doit déterminer si une extension est possible (voir section III A). On peut aussi utiliser plusieurs consignateurs de données dans une même expérience, mais on augmente alors le travail de programmation, d'extraction de données et de diagnostic des anomalies ainsi que la probabilité qu'un des appareils tombe en panne.

Les canaux disponibles doivent permettre à la fois des mesures simples (les mesures sont rapportées à la terre ou à une tension étalon) et des mesures différentielles (les indications sont basées sur la différence de tension entre deux entrées). Les mesures simples permettent d'utiliser deux fois plus de capteurs que les mesures différentielles. Le fournisseur de capteurs peut généralement aider l'utilisateur à déterminer quel type de mesure convient le mieux pour une expérience donnée.

Si l'on désire analyser rapidement les données d'un grand nombre de capteurs, il est conseillé de vérifier dans les spécifications du consignateur de données le nombre de canaux qui peuvent être balayés par unité de temps. À moins que cela soit absolument nécessaire, il n'est pas recommandé d'effectuer de balayage à intervalles très courts (par ex., moins de 1 min) car il faut alors recharger plus souvent la batterie (à moins d'installer une source de courant plus forte) et, dans le cas où le système comporte des relais de commutation, etc., les contraintes qui s'exercent sur certains éléments électromécaniques sont accrues.

B.2 Canaux de comptage numériques

Ces canaux peuvent remplir plusieurs fonctions requises lors de mesures environnementales. Utilisés dans un mode, ils permettent de compter les signaux d'entrée correspondant à un nombre

spécifié d'impulsions, comme avec les pluviomètres à auget basculeur. Utilisés dans un autre mode, ils peuvent aussi mesurer des fréquences, comme avec les anémomètres.

B.3 Sorties de tension numériques ou analogiques

Ces sorties jouent habituellement le rôle de canaux d'excitation en fournissant une tension donnée au capteur avant que la mesure soit effectuée. L'utilisateur doit pouvoir régler la tension et l'appareil doit permettre l'excitation en courant continu et alternatif. (Un courant alternatif est nécessaire pour les mesures de résistance dans certains capteurs de potentiel d'humidité du sol tels que les blocs de gypse, certaines sondes d'humidité relative ou de point de rosée et les grilles de mesure de l'humidité des feuilles). Les sorties de tension peuvent être utilisées pour commander des appareils extérieurs ou pour actionner des relais de commutation tels que ceux trouvés sur les multiplexeurs. Enfin, elles peuvent aussi servir de signal d'alarme en cas de mauvais fonctionnement du capteur.

B.4 Enregistrement du temps

Dans la plupart des recherches, il est indispensable de disposer d'un consignateur de données équipé d'un système précis de mesure du temps indiquant l'heure (horloge de 24 h), le jour, le mois (facultatif) et l'année. Avec certains paramètres, le temps doit être enregistré en termes de secondes, voire de fractions de seconde. Cette information doit être consignée au début de chaque séquence de données. Une horloge ou tout autre mécanisme de mesure du temps est aussi nécessaire pour faire fonctionner les relais ou commutateurs extérieurs aux moments voulus. Dans certains cas, il faut réintroduire le programme lorsqu'on remet l'horloge à l'heure, ce qui peut prendre beaucoup de temps. Il convient de comparer la précision de l'horloge indiquée dans les spécifications du fabricant avec la précision requise.

B.5 Protection

Il est recommandé que toutes les connexions d'entrée et de sortie du consignateur de données soient protégées par des éclateurs ou par des barrières zeners. On réduit ainsi les risques que les éléments internes de l'appareil soient endommagés par les pointes de tension dues aux décharges orageuses survenant à proximité. La plaque de terre connectée aux éclateurs doit aussi pouvoir être connectée à un fil de cuivre de gros calibre qui sera acheminé vers une tige de mise à la terre, de préférence dans un sol humide. Certains fabricants recommandent d'utiliser et fournissent des boîtes de dérivation protégées par des éclateurs compatibles avec les consignateurs de données. Selon les fabricants, ces boîtes de jonction fournissent une protection supplémentaire contre les décharges orageuses. Elles simplifient aussi la tâche lorsqu'il s'agit de retirer le consignateur de données du site car il est possible d'utiliser des câbles ordinaires pour connecter les capteurs (par ex., les prises de terre) aux plaquettes de connexion de la boîte de dérivation, ce qui réduit le nombre de câbles connectés directement au consignateur de données.

Si le consignateur de données doit être installé dans un endroit découvert, il est indispensable de connaître sa durabilité environnementale, en particulier sa résistance à l'humidité. Les périphériques tels que les unités de mémoire, les magnétophones et les multiplexeurs requièrent le même soin. Tous les blocs numériques ou commutateurs exposés doivent être munis d'un couvercle étanche. En ce qui concerne le microprocesseur incorporé dans les consignateurs de données, il devrait être possible de le protéger de la condensation avec un produit déshydratant approprié tel qu'un gel de silice. Une protection additionnelle sous forme de contenants étanches à l'eau, de préférence en plastique, est aussi recommandée pour l'installation à l'extérieur. L'utilisateur peut aussi sceller les ouvertures prévues pour les câbles avec un produit de calfeutrage étanche à l'eau ou construire des enveloppes étanches.

Bien que la plupart des fabricants ne protègent pas spécifiquement leurs consignateurs de données et leurs accessoires contre les vandales et les animaux, il est bon de vérifier si les capteurs et les abris possèdent des éléments susceptibles de réduire les risques de dommages de ce type : mécanismes de verrouillage ou trous renforcés pour des cadenas, peinture sombre et mate, verte ou marron clair permettant le camouflage, relais silencieux ou peu bruyants, matériaux désagréables au goût, etc. On peut aussi chercher à installer les capteurs et le consignateur de données dans un endroit où les risques de vandalisme sont faibles. Si possible, tous les câbles menant aux capteurs seront enterrés. Néanmoins, il convient de bien noter les emplacements de ces

tranchées car les fils pourraient être endommagés lors d'activités futures telles que la plantation ou l'échantillonnage et il serait alors difficile et coûteux de localiser les dommages.

B.6 Caractéristiques et conditions de fonctionnement

Les utilisateurs doivent vérifier dans les spécifications du fabricant l'exactitude de l'appareil à un niveau donné de sensibilité ainsi que la stabilité temporelle dans les conditions de fonctionnement prévues. Le fabricant doit aussi spécifier les plages de température et d'humidité relative dans lesquelles l'élément concerné peut fonctionner. Lorsqu'il s'agit de nouveaux capteurs ou de capteurs moins courants, il est bon de vérifier à quels essais de durabilité environnementale les appareils ont été soumis en usine. La plupart des fabricants soumettent leurs appareils à des essais de fonctionnement dans des conditions de température extrêmes, mais certains ne vérifient pas le fonctionnement dans des conditions d'humidité relative variables.

B.7 Alimentation en électricité

Il convient de vérifier les exigences du système en matière d'alimentation électrique. Lorsqu'une source de courant alternatif est disponible, il est possible que l'on puisse utiliser un transformateur CA/CC pour faire fonctionner le consignateur de données. Il convient aussi de disposer d'un groupe de batteries de secours en cas de panne de courant. Sur les sites éloignés où il n'y a pas de source de courant alternatif, le système doit être équipé d'un circuit à faible consommation d'énergie de façon à pouvoir être branché sur des piles sèches ou sur des accumulateurs humides. On peut généralement estimer la consommation de courant, en tenant compte du nombre et du type de capteurs ainsi que de la fréquence de mesure, à partir des spécifications du fabricant du consignateur de données. Cela permet à l'utilisateur de déterminer la capacité de la batterie requise, en ampères-heures. L'utilisateur doit aussi vérifier la tension de la batterie indiquée par le consignateur de données, si l'appareil possède cette fonction, et se rappeler que la tension chute rapidement vers la fin de la durée de vie de la batterie. On peut augmenter la capacité de la batterie (ampérage) en associant plusieurs batteries en parallèle, chaque batterie ayant la tension requise par le consignateur de données. Ces batteries ne doivent pas être montées en série car la tension pourrait alors être trop forte et endommager l'appareil. Avec certains consignateurs de données, on peut aussi utiliser des batteries rechargeables combinées à des capteurs solaires.

B.8 Communications/Stockage des données

Une grande capacité de mémoire est particulièrement indispensable lorsque le consignateur de données est installé en région éloignée où les visites régulières, les connexions téléphoniques via un modem ou la transmission des données par radio UHF/VHF ou par satellite sont impossibles. Comme dispositif de secours, on peut utiliser une unité extérieure de stockage des données à semi-conducteurs avec une mémoire morte reprogrammable (EPROM) ou un enregistreur à cassette si les conditions le permettent (température de l'air supérieure à -10°C). Ces dispositifs sont recommandés quelle que soit l'expérience car ils permettent d'accroître la capacité de stockage des données sur le site et ils peuvent servir de dispositif de secours en cas de panne de mémoire due à des batteries épuisées, des décharges orageuses, etc.

Les données enregistrées par un consignateur de données sont généralement transférées à un ordinateur en vue d'un traitement ultérieur et de la production de graphiques ou de tableaux. Avec certains systèmes, les données peuvent être transférées directement du consignateur de données à une imprimante et ces données sont résumées sous le format désiré, avec les en-têtes appropriés, etc. Toutefois, dans la plupart des cas, les données sont envoyées du consignateur de données, du module de stockage des données ou de l'enregistreur à cassette vers un ordinateur (micro, mini ou central). L'utilisateur doit alors disposer du logiciel et du matériel nécessaires, qui doivent être compatibles avec le système informatique. La plupart des consignateurs de données sont dotés des éléments nécessaires pour le transfert de données à un IBM-PC et autres micro-ordinateurs compatibles. Dans ce cas et dans d'autres cas, par exemple avec l'emploi d'imprimantes et de modems, le consignateur de données doit aussi être doté d'un dispostif de communication RS232C avec divers débits en bauds[1] possibles (par ex., 300 à 9600).

[1] Le débit en bauds est le débit de transmission et de réception de l'information par du matériel électronique. Il est exprimé en multiplets par seconde.

L'utilisateur doit vérifier que le consignateur de données choisi peut récupérer les données mises en mémoire sans que la collecte de données soit interrompue.

C. Affichage des données et programmation

Un afficheur à cristaux liquides facilement accessible et bien visible est essentiel. Le consignateur de données doit pouvoir afficher des détails tels que les données actuelles et les données mises en mémoire classées suivant le jour et l'heure, la condition de la batterie (tension) et, si possible, les données pendant une période de temps choisi qui contiennent des valeurs erronées ou hors limites. L'utilisateur peut ainsi vérifier que les données sont correctes et qu'elles sont bien mises en mémoire. Il est important que les données de vérification susmentionnées puissent être affichées en même temps que les données sont consignées.

Le consignateur de données comporte généralement deux modes de programmation pour le traitement des données d'entrée et de sortie. Le mode d'entrée définit comment chaque canal d'entrée est lu et comment les données sont converties en unités d'ingénierie normalisées. Lorsque les capteurs sont fournis par le fabricant du consignateur de données, les équations nécessaires pour convertir les données de sortie des capteurs seront fournies. Avant d'acheter du matériel non standard, l'utilisateur doit vérifier si de telles conversions sont disponibles. Il est souhaitable de connaître les intervalles de confiance de ces équations, qui sont normalement indiqués dans le manuel d'instructions accompagnant le capteur. Il est possible aussi que les capteurs aient été étalonnés individuellement. Là encore, l'utilisateur doit pouvoir introduire l'étalonnage de chaque capteur dans le programme.

Le programme de sortie du consignateur de données doit avoir la capacité de comprimer ou de résumer les données recueillies pendant une période de temps définie par l'utilisateur. Un grand nombre de consignateurs de données sont capables de fournir des moyennes, des maximums ou des minimums pour chaque capteur pendant une période de temps programmable par l'utilisateur. Ces données sont conservées dans la mémoire «finale». De tels consignateurs de données possèdent une mémoire distincte pour les données balayées initialement et une mémoire «finale» dans laquelle sont conservées les moyennes (ou autres données traitées). Avec ces appareils, il est utile que la quantité de mémoire allouée à ces deux fonctions puisse varier. Cela permet d'augmenter la mémoire finale lorsque seulement un petit nombre de capteurs sont échantillonnés ou d'augmenter la mémoire initiale pour contrôler un grand nombre de capteurs.

Bien que cela ne soit pas essentiel, il est bon que le consignateur de données puisse signaler les indications du capteur qui se trouvent à l'extérieur d'une plage acceptable définie par l'utilisateur. On peut se servir de cette fonction pour déterminer, par exemple, si le capteur fonctionne mal ou si des conditions environnementales extrêmes ayant des conséquences importantes sur les résultats de l'expérience se sont produites (par ex., gel, forte chute de pluie ou vents violents).

IV. Types d'instruments météorologiques pouvant être facilement utilisés avec les consignateurs de données

A. Capteurs de rayonnement solaire

A.1 Pyranomètre et radiomètre différentiel

Le pyranomètre (fig. 1) mesure le rayonnement total de courte longueur d'onde provenant du soleil (direct) et du ciel (diffus). Le récepteur, qui est continuellement exposé aux caprices du temps, est enfermé dans une capsule de verre ou de quartz qui doit être conservée propre et sèche. La capsule de verre ou de quartz ne fait pas que protéger le récepteur contre les éléments, elle transmet aussi des longueurs d'onde particulières (entre 0,35 et 2,8 µm pour le verre et entre 0,25 et 4,0 µm pour le quartz). La surface du récepteur comporte deux ou plusieurs éléments. La moitié de chaque élément est noire pour absorber le rayonnement incident, l'autre moitié étant blanche avec une réflectivité élevée dans les courtes longueurs d'onde. La différence de température entre les éléments noir et blanc dépend du rayonnement solaire incident. Le pyranomètre peut aussi être employé pour mesurer les composantes directe et diffuse du rayonnement solaire et l'albédo d'une surface (réflectivité).

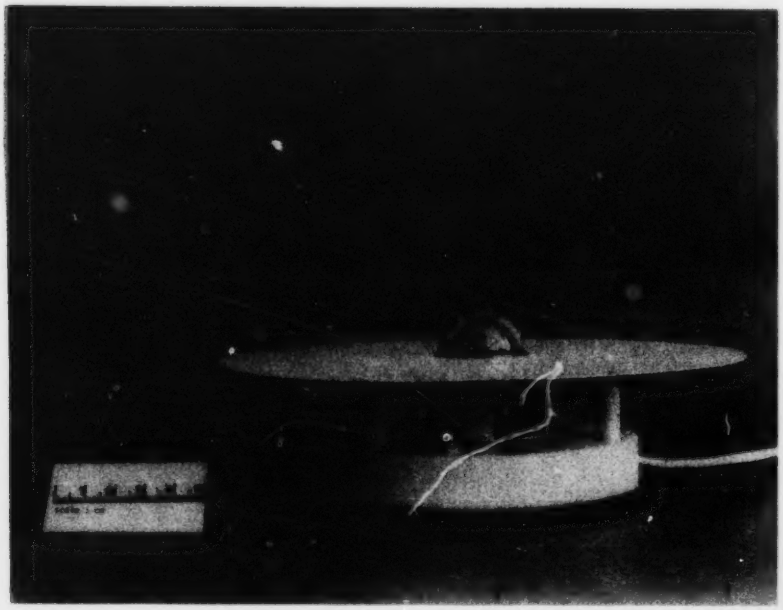


Figure 1. Pyranomètre

Le radiomètre différentiel a été conçu pour mesurer le rayonnement net de courte et de grande longueur d'onde (incident-réfléchi). Le radiomètre différentiel est placé à une faible hauteur au-dessus du sol et comporte deux éléments sensibles noircis et identiques, l'un dirigé vers le bas et l'autre vers le haut. Le rayonnement net est proportionnel à la différence de température entre les deux éléments. Le capteur est généralement enfermé dans une sphère de polyéthylène qui le protège de l'environnement. On utilise le polyéthylène ou un plastique similaire car il laisse passer à la fois les courtes et les grandes longueurs d'onde.

L'unité normalisée de mesure du rayonnement est le mégajoule par mètre carré (MJm^{-2}) ou le watt par mètre carré (Wm^{-2}). L'intervalle d'échantillonnage pour le pyranomètre et le radiomètre différentiel doit être relativement court (par ex., 5 min), mais cela dépend de la nature de l'étude.

Des détails supplémentaires sur les pyranomètres et les radiomètres différentiels sont donnés dans Lee (1978), Monteith (1972), Sellers (1965) et Unwin (1980).

A.2 Capteurs quantiques

Les capteurs quantiques (fig. 2) sont utilisés couramment dans les études de photosynthèse où l'on veut connaître le rayonnement solaire dans la bande de longueurs d'onde 400-700 nm (Federer et Tanner 1966). L'unité de mesure normalisée est appelée densité de flux photonique et elle est exprimée en $\mu Em^{-2}s^{-1}$ avec 1 $\mu E = 6{,}02 \times 10^{17}$ photons. On peut enregistrer une densité de flux photonique de 2000 $\mu Em^{-2}s^{-1}$ en plein soleil (Anon. 1985).

Ces capteurs requièrent un étalonnage initial et un étalonnage périodique (tous les deux ans selon un important fabricant de capteurs quantiques). Pour ces étalonnages, on utilise une source de lumière étalonnée pour convertir la tension indiquée par le capteur en densité de flux photonique. Pour obtenir des mesures précises, il est important que la gaine du détecteur reste propre et que le support soit bien de niveau.

La quantité de lumière reçue pendant une période donnée peut varier considérablement en fonction de la couverture nuageuse et du couvert végétal (mouvement dû au vent, etc.). Par conséquent, l'intervalle d'échantillonnage doit

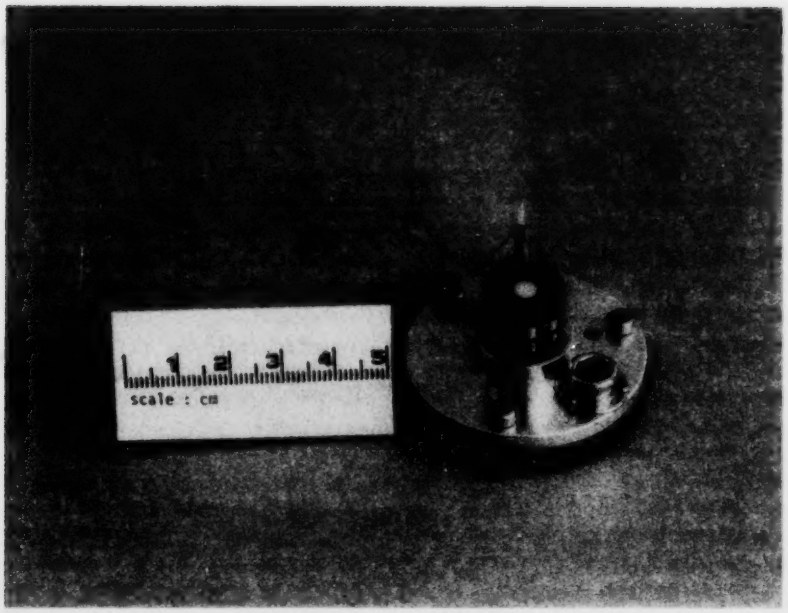


Figure 2. Capteur quantique

être relativement court (par ex., 1 à 5 min), par comparaison avec d'autres paramètres moins variables tels que la température du sol et l'humidité.

B. Capteurs de température

Il existe trois types courants de capteurs utilisés pour mesurer la température de l'air et du sol qui peuvent être connectés à des consignateurs de données. Deux capteurs, le thermomètre à résistance et le thermocouple, sont basés sur les propriétés électriques des métaux; le troisième capteur, le thermistor, est basé sur les propriétés électriques des oxydes métalliques.

Le principe du thermomètre à résistance est le suivant. La résistance d'un métal au passage de l'électricité augmente avec la température; si l'on connaît les caractéristiques de résistance d'un métal, on peut déterminer la température en mesurant la résistance offerte par le métal au passage d'un courant électrique de faible intensité connu. Le platine est l'élément qui convient le mieux pour les thermomètres à résistance en raison de sa stabilité.

Les thermocouples consistent en deux fils métalliques différents connectés à deux jonctions. Une tension proportionnelle à la différence de température entre les jonctions est produite. La température (tension) à l'une des jonctions (référence) est connue; on peut donc déterminer la température à l'autre jonction en mesurant la tension si l'on connaît les propriétés électriques des deux métaux. Un thermocouple couramment utilisé est constitué de fils de cuivre et de constantan (Cu-Cn); il développe une tension d'environ 0,04 millivolts par °C. On peut associer plusieurs thermocouples en série. Un tel arrangement, appelé thermopile, est utilisé pour accroître la sensibilité.

Les thermistors sont basés sur le principe que la résistance électrique dépend de la température. Pour les métaux vrais, la résistance augmente avec la température, mais, suivant la composition, l'inverse peut être vrai pour les thermistors. Les thermistors, qui sont habituellement composés d'oxydes métalliques, présentent aussi une remarquable sensibilité aux variations de température. Pour un oxyde métallique pur, la variation de la résistance avec la température n'est pas linéaire. En combinant deux ou plusieurs oxydes, il est possible d'obtenir une variation linéaire sur une plage donnée de température. C'est pour cette

raison que le thermistor est le capteur de température le plus couramment utilisé avec les consignateurs de données.

Lors de la mesure de la température de l'air, le capteur doit être à l'abri des éléments, en particulier du rayonnement. Suivant le type de capteur et le type d'étude, il peut être nécessaire de ventiler le capteur de température.

Les capteurs de température doivent être étalonnés de préférence avant et après chaque expérience et au moins une fois l'an. Pour étalonner le capteur, on le comparera à un ou plusieurs capteurs de référence sur la plage de température prévue. Les capteurs qui ne donnent pas une indication exacte de la température doivent être éliminés.

Des détails supplémentaires sur les capteurs de température sont donnés dans ASTM(1981), Doebelin (1966), Schooley (1986), Wang et Felton (1983) et Fritschen et Gay (1979).

C. Capteurs d'humidité relative

Les différents paramètres d'humidité que l'on peut mesurer ou calculer sont l'humidité relative, l'humidité spécifique, le point de rosée, le rapport de mélange et la pression de vapeur. Dans le présent rapport, nous examinerons seulement la mesure de l'humidité relative par des capteurs couramment utilisés avec les consignateurs de données. Nous considérerons ainsi deux capteurs : le capteur à impédance électrolytique et le capteur capacitif à polymère.

Le capteur à impédance électrolytique est basé sur le principe que l'impédance d'un électrolyte liquide ou d'une plaquette de plastique traité varie avec l'humidité relative ambiante. Le capteur capacitif à polymère, quant à lui, est basé sur le principe que la capacité d'un polymère solide varie avec l'humidité relative.

Les capteurs d'humidité relative doivent être étalonnés au moins une fois l'an. L'étalonnage se fait avec des sels chimiques ou des chambres d'humidité, ou encore par comparaison avec des instruments de référence. Pour les vérifications sur le terrain, on utilisera un capteur d'humidité relative portatif. Un psychromètre à main est idéal. Le psychromètre mesure les températures du thermomètre sec et du thermomètre humide[1]. On calcule ensuite l'humidité relative à l'aide de l'équation psychrométrique. On peut ainsi vérifier l'humidité relative et la température sur le terrain. Les deux types de capteurs, à impédance et capacitif, ont un moniteur de température car l'humidité relative dépend fortement de la température. Les éléments de ces deux types de capteurs doivent être remplacés selon les instructions du fabricant (en général, tous les ans ou tous les deux ans).

Les indications fournies par le capteur à impédance électrolytique et par le capteur capacitif à polymère se situent dans la plage 0-100% d'humidité relative. La fréquence d'échantillonnage dépend de l'expérience et peut varier d'une fois par minute à une fois par jour. Les capteurs d'humidité relative doivent aussi être tenus à l'abri du rayonnement et des intempéries. Muller et Beekman (1987) ont examiné le problème de l'hystérésis que présentent certains capteurs capacitifs à polymère. Avec certains capteurs, l'obtention de mesures précises de l'humidité relative après un jour de saturation peut prendre jusqu'à une semaine.

D'autres détails sur les capteurs d'humidité sont donnés dans les actes de l'International Symposium on Moisture and Humidity (1985).

D. Capteurs de potentiel d'humidité du sol

L'enregistrement continu de l'humidité du sol à l'aide de consignateurs de données est possible seulement lorsque les capteurs appartiennent au groupe de capteurs qui mesurent le potentiel hydrique du sol. Nous examinerons brièvement les instruments suivants, qui appartiennent tous à cette catégorie : capteurs à résistance électrique, tensiomètres et psychromètres à thermocouple.

L'unité normalisée de potentiel hydrique est le pascal (Pa), mais on utilise encore couramment le bar (1 atmosphère = 0,05 MPa = 1 bar). Étant donné que le potentiel d'humidité du sol varie peu au cours d'une journée, il n'est pas nécessaire

[1] La température du thermomètre sec est la température ambiante. La température du thermomètre humide est la plus basse température atteinte par l'air qui se refroidit par évaporation de l'eau à une pression atmosphérique constante. On obtient la température du thermomètre humide en couvrant le capteur de température avec une mousseline propre humide et en le ventilant au moyen d'un ventilateur ou d'une fronde.

normalement d'utiliser un intervalle d'échantillonnage court. Par exemple, si les résultats doivent être analysés tous les jours ou toutes les semaines (au lieu de toutes les heures), un intervalle de 30 min à une heure entre les échantillonnages est plus que suffisant. Dans certaines circonstances, il est même préférable de prendre des mesures encore moins fréquemment (pas plus de deux fois par jour), par exemple lorsque les températures du sol fluctuent considérablement ou lorsque les capteurs sont sensibles à des gradients de température.

D.1 Capteurs à résistance électrique

Ces capteurs de potentiel d'humidité du sol mesurent la résistance électrique de fils enrobés dans un matériau de référence poreux, dans le sol, dans lesquels circule un courant alternatif. La résistance des blocs dépend alors de la teneur en eau dans la matrice du capteur, qui est en équilibre avec le potentiel d'humidité du sol. La matrice de référence est en général en fibre de verre, en nylon ou en gypse. Dans le cas des blocs en fibre de verre et en nylon, les ions conducteurs d'électricité sont fournis par la solution du sol et, partant, ces blocs ne peuvent être utilisés qu'avec des sols non salins (Campbell, 1987). Par contre, les blocs de gypse libèrent des ions dans la solution du sol et constituent un milieu conducteur relativement stable dans une grande variété de sols.

L'étalonnage individuel des trois types de capteurs se fait de la façon suivante : on établit une relation entre la résistance et les indications de l'appareil et entre la résistance et le potentiel d'humidité du sol. Certains fabricants de blocs de gypse fournissent des formules qui s'appliquent à tous les blocs; il n'est pas nécessaire alors d'étalonner les blocs individuellement. Très souvent, ces formules sont satisfaisantes mais il est préférable de demander conseil au fabricant si l'on désire un haut degré de précision. Le fabricant recommandera alors une méthode d'étalonnage individuel.

Les blocs de gypse sont plus précis dans les sols humides dont la force de rétention est inférieure à 1 bar. Dans les sols secs et grossiers, ces appareils peuvent se détacher du sol et fournir des indications extrêmement élevées et inexactes. Pour remédier à ce problème et favoriser un meilleur contact avec le sol, il est recommandé d'entourer le bloc d'une petite quantité de boue fine, telle que de l'argile humide, une fois le bloc déposé dans le sol. Selon certains auteurs, dans la plage habituelle de mesure (0,1 à 15 bars), les indications fournies par les blocs de gypse sont entachées d'une incertitude absolue de ±10% (Carlson et Salem, 1987). Ces blocs présentent plusieurs avantages par rapport aux capteurs qui ne font pas appel à la résistance électrique: il est facile d'en installer un grand nombre et de les connecter à un consignateur de données situé à distance, ils sont peu coûteux et ils sont relativement faciles à étalonner (avec certaines marques, cela n'est même pas nécessaire). Les blocs de gypse sont aussi plus appropriés pour les sols salins car ils ont un certain pouvoir tampon. Par contre, ce transfert d'ions entraîne une dégradation du bloc et il peut être nécessaire de remplacer les blocs tous les ans, surtout dans les sols humides à texture fine. Par ailleurs, leur plage de fonctionnement est plus étroite que celle des psychromètres et ils sont moins exacts que les tensiomètres et les psychromètres.

Les blocs en fibre de verre ont des pores de dimension variable et des éléments sensibles fins, ce qui leur permet de répondre rapidement à différentes teneurs en humidité du sol. Leurs principaux inconvénients sont une faible sensibilité dans des sols plus secs et un manque de pouvoir tampon dans les sols salins dû à l'absence de matériau d'ionisation pour neutraliser l'effet des sels solubles. Par conséquent, leur emploi est généralement limité à des sols non salins très humides ou modérément humides. Par ailleurs, le matériau constituant ces blocs étant moins uniforme que le gypse, les capteurs doivent être étalonnés individuellement.

Avec tous les instruments basés sur la conductivité électrique, les indications sont entachées d'erreurs dues à la température car la résistance électrique varie de façon inversement proportionnelle avec la température. En conséquence, il est recommandé d'installer les capteurs à une profondeur d'au moins 10 cm, pour réduire au minimum les effets de la fluctuation de la température du sol et des gradients d'humidité. Si les capteurs sont installés à une profondeur plus faible, il peut être nécessaire de prendre les mesures dans des conditions d'isothermie (par ex., à la fin de la journée ou tôt le matin).

D.2 *Tensiomètres*

Les tensiomètres mesurent la pression de succion nécessaire pour équilibrer l'eau au travers d'une membrane poreuse avec la solution du sol (Campbell, 1987). Cette pression de succion est appelée potentiel matriciel du sol. Les tensiomètres sont surtout utiles pour des forces de rétention allant jusqu'à 0,85 bars. Par conséquent, ils conviennent tout particulièrement dans les expériences d'irrigation ou lorsque les sols restent relativement humides. Dans de telles conditions, les tensiomètres sont assez exacts et, contrairement à d'autres types de capteurs, ils sont durables et plutôt bon marché. Enfin, les indicateurs de vide des tensiomètres restent étalonnés pendant longtemps. Cependant, le tensiomètre étant rempli d'eau, il est nécessaire de remplacer périodiquement l'eau perdue; l'instrument est aussi sujet au gel.

D.3 *Psychromètres à thermocouple*

Le psychromètre à thermocouple est un capteur de potentiel hydrique couramment utilisé, en particulier dans les laboratoires d'analyse de sol. Il est exact sur une large gamme de forces de rétention, jusqu'à 80 bars (Brown et Chambers, 1987). Il est basé sur la mesure du potentiel hydrique (humidité) de la phase vapeur d'un petit échantillon d'air contenu dans une ampoule en céramique poreuse placée dans le sol. Cette mesure de l'humidité est liée au potentiel hydrique du sol. Pour mesurer l'humidité présente, un courant est envoyé dans un thermocouple, en opposition avec le potentiel normal. Ce courant refroidit le couple thermoélectrique à une température inférieure au point de rosée, forçant l'humidité de l'air à condenser. Le courant est ensuite interrompu pour permettre à l'eau de s'évaporer et au couple thermoélectrique de se réchauffer. Le réchauffement du couple thermoélectrique dépend de l'humidité et du potentiel hydrique du sol. Les psychromètres à thermocouple actuels permettent d'atteindre une précision de 0,05 bars sur la mesure du potentiel hydrique (Briscoe, 1984). Cependant, contrairement aux tensiomètres et aux résistances, ils ne sont pas fiables lorsque le potentiel hydrique du sol est faible (sol très humide).

La nécessité d'un courant de refroidissement limite le nombre de consignateurs de données qui peuvent fonctionner avec cet instrument. En général, seuls les consignateurs de données les plus coûteux sont capables de produire de très faibles tensions avec précision. Les capteurs eux-mêmes sont aussi beaucoup plus coûteux que les capteurs à résistance électrique mentionnés ci-dessus. Un autre inconvénient réside dans la difficulté d'étalonner ces capteurs avec des échantillons de potentiel hydrique connu, en particulier pour les mesures *in situ* (Boyer, 1987; Briscoe, 1984).

Un autre facteur limite l'emploi du psychromètre sur le terrain en vue d'un contrôle continu de données, à savoir son extrême sensibilité à des gradients de température tels que ceux présents dans l'horizon racinaire (Campbell, 1987; Briscoe, 1984). Des différences entre la température du sol et celle du couple thermoélectrique influent considérablement sur la précision de la mesure du potentiel hydrique du sol. Ainsi, Brown et Chambers (1987) recommandent que ces psychromètres soient installés à des profondeurs d'au moins 15 à 30 cm (suivant la texture du sol; la profondeur doit être plus grande dans des sols à texture fine) et en position horizontale plutôt que verticale. Ils suggèrent aussi de placer un fil conducteur de 5 à 10 cm près de la tête sensible du psychromètre afin de réduire les effets de conduction de chaleur. Il est conseillé également de prendre les mesures à des moments où les gradients de température du sol sont minimaux.

E. Pluviomètres

Le plus souvent, les chutes de pluie sont mesurées à l'aide d'un mécanisme à auget basculeur : une impulsion électrique est produite chaque fois qu'une quantité prédéterminée de pluie a été recueillie (0,25 mm ou 0,01 po). Le pluviomètre (fig. 3) consiste en un cylindre se terminant par un entonnoir qui conduit la pluie vers un récipient divisé en deux placé en équilibre instable sur un axe horizontal. La pluie est recueillie dans un compartiment et, lorsque ce compartiment est plein, l'auget bascule, déversant la pluie recueillie. L'autre compartiment commence alors à se remplir. Lorsque l'auget bascule, un aimant ferme momentanément un commutateur à lames et une impulsion est émise. On peut aussi utiliser un pluviomètre qui pèse l'eau recueillie. Une équation simple permet ensuite de convertir le poids en hauteur d'eau.

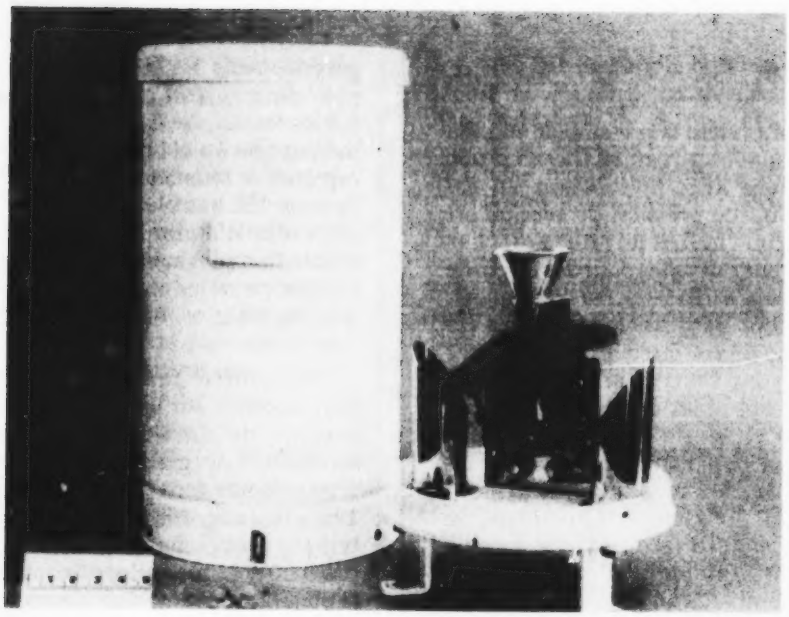


Figure 3. Pluviomètre à auget basculeur

On peut étalonner les pluviomètres à auget basculeur en versant lentement un volume d'eau équivalent à un nombre donné de fois que l'auget bascule. Une méthode similaire s'applique au pluviomètre qui mesure le poids. En général, l'étalonnage effectué par le fabricant est bon pour un certain nombre d'années à moins que des matériaux divers s'accumulent dans l'auget.

F. Capteurs de vitesse et de direction du vent

La vitesse du vent est mesurée à l'aide d'un anémomètre et sa direction à l'aide d'une girouette. Habituellement, on mesure seulement la composante horizontale, mais il existe des anémomètres qui permettent de mesurer la composante verticale. Le type d'anémomètre le plus courant est l'anémomètre à coupes (fig. 4). Les coupes, habituellement au nombre de trois, peuvent tourner librement autour d'un axe

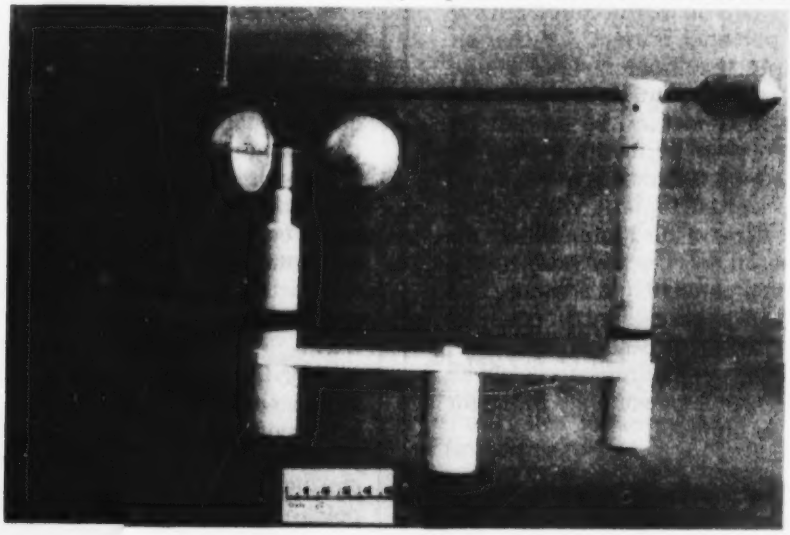


Figure 4. Anémomètre à trois coupes et girouette.

vertical. La rotation des coupes produit une tension qui peut être utilisée pour déterminer la vitesse du vent. Les anémomètres sont étalonnés en usine et chaque appareil est accompagné d'une équation simple qui permet de convertir la tension en vitesse du vent. Un autre type d'anémomètre à coupes comporte un disque interrupteur perforé installé sur l'arbre de l'anémomètre, qui coupe un faisceau lumineux un certain nombre de fois par révolution. Une impulsion est produite chaque fois que le faisceau lumineux est interrompu. La fréquence des impulsions est proportionnelle à la vitesse du vent. L'anémomètre à disque interrupteur perforé requiert une source de courant relativement puissante et il convient mieux pour les endroits où il y a une source de courant alternatif. Lorsqu'il n'y a pas de source de courant alternatif, on peut déterminer la vitesse de rotation des coupes et, partant, la vitesse du vent, en utilisant un commutateur à lames magnétiques à la place d'un faisceau lumineux. Dans un autre type d'anémomètre, les coupes sont remplacées par des hélices. Cet anémomètre peut pointer dans le vent ou bien l'on peut utiliser deux appareils pour obtenir les composantes du vent. Il n'est pas nécessaire alors d'avoir une girouette. Il existe aussi des anémomètres à fil chaud et des anémomètres acoustiques.

Les girouettes (fig. 4) sont souvent équipées d'un potentiomètre possédant une bande morte étroite. La tension indiquée par le potentiomètre peut être convertie en une direction. Les girouettes peuvent aussi faire appel à des techniques photoélectroniques et à des commutateurs à lames magnétiques pour indiquer la direction du vent.

Le chercheur doit décider à quelle hauteur il convient de mesurer la vitesse et la direction du vent. Cette décision dépend de la nature de la recherche. Dans les stations météorologiques, la hauteur normale est de 10 m, dans un endroit dégagé de façon que la distance entre l'anémomètre et l'obstacle le plus proche soit égale à au moins dix fois la hauteur de l'obstacle (OMM, 1983). Quelle que soit la hauteur choisie, l'anémomètre doit être installé en terrain dégagé.

V. Installation d'un consignateur de données à l'Institut forestier national de Petawawa (lac Cartier) : Étude de cas

A. Introduction

On choisit le consignateur de données 21X de Campbell Scientific Corp. pour contrôler diverses conditions environnementales (températures de l'air et du sol, d'humidité du sol, humidité relative et rayonnement photosynthétiquement utilisable) dans une plantation expérimentale située dans le secteur nord-ouest de la forêt expérimentale de l'IFNP, sur la rive nord du lac Cartier. Dans cette expérience, on étudie l'effet de facteurs tels que la température du sol, la nutrition minérale et la compétition des broussailles sur l'établissement de la plantation et la croissance initiale des plants (Brand et Janas, 1988; Brand, 1988).

B. Description de l'expérience

Cette plantation expérimentale consiste en une série de parcelles de 20 x 40 m. Chaque parcelle contient 200 arbres (100 épinettes blanches et 100 pins blancs) et est traitée de façon à créer différentes conditions de température de sol (trois niveaux : sols frais, moyennement chauds et chauds), d'apport en éléments minéraux (deux niveaux : fertilisé et non fertilisé), et de compétition des broussailles (deux niveaux : sols débroussaillés et sols non débroussaillés). Ces 12 traitements (3x2x2) créent une gamme de conditions pour la croissance des plants. L'expérience comporte quatre blocs identiques organisés selon un dispositif factoriel en split-plot à blocs complets (fig. 5).

L'objectif de l'expérience est de quantifier l'effet des différentes conditions environnementales sur la survie et la croissance des conifères plantés. Pour cela, on choisit annuellement un groupe d'arbres échantillons (trois par parcelle par espèce) dans chacune des 48 parcelles et l'on évalue un certain nombre de paramètres de croissance ainsi que diverses caractéristiques de développement et de nutrition. Ces données sont ensuite analysées et les effets éventuels du traitement évalués. La surveillance environnementale facilite la définition des effets des traitements en termes de lumière, humidité et température.

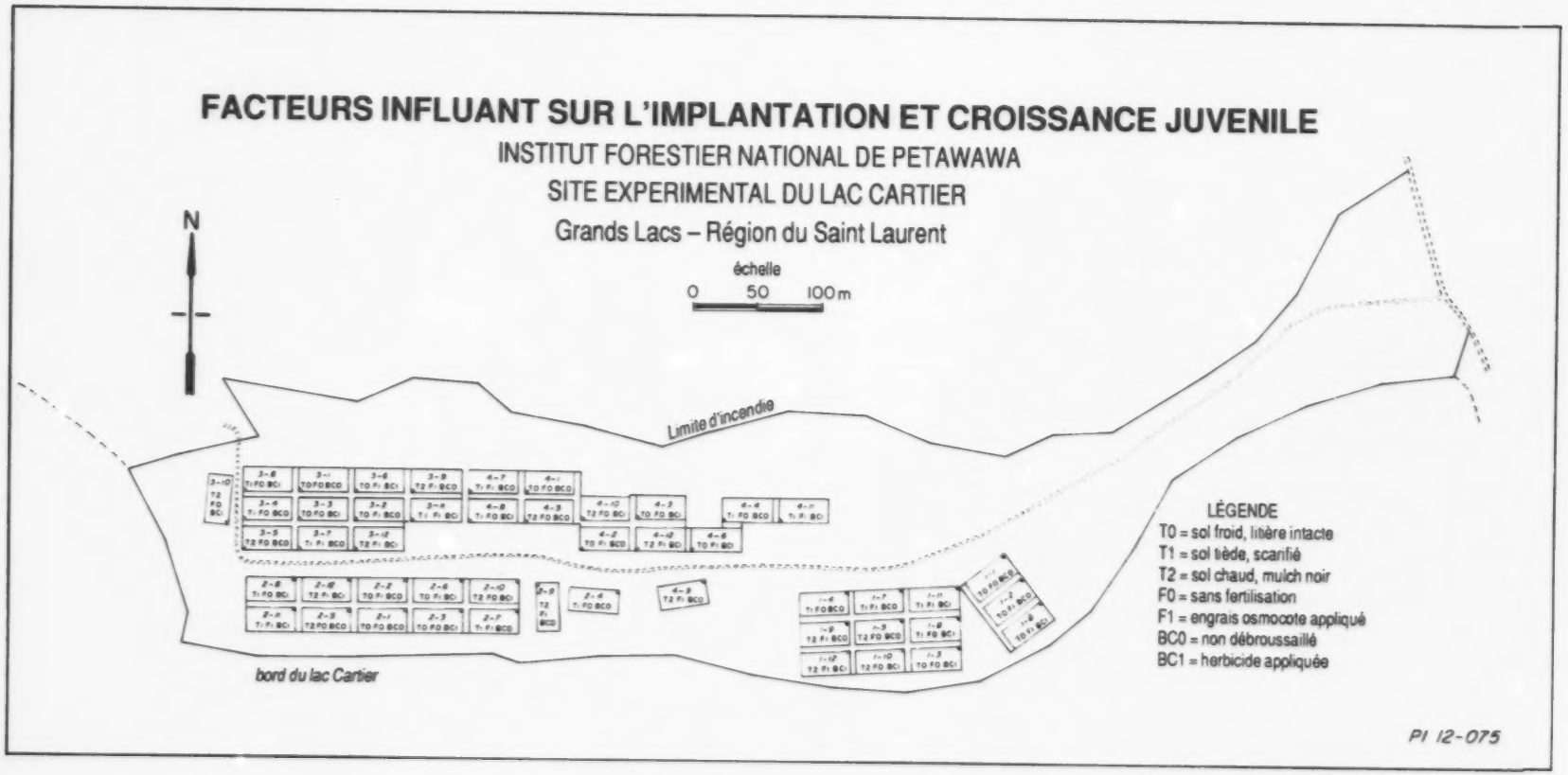


Figure 5. Répartition des blocs et des parcelles sur le site expérimental du lac Cartier.

C. Types de capteurs et disposition

Diverses conditions environnementales sont contrôlées en des endroits représentatifs dans deux des blocs de la plantation (soit 24 parcelles) pendant la saison de croissance, de mai à septembre. Quatre-vingt-huit capteurs sont installés de la façon illustrée à la fig. 6.

Dans chaque parcelle, la température du sol est mesurée à 2 et 10 cm sous la surface du sol minéral à l'aide de thermocouples de cuivre-constantan (Campbell Scientific, modèle 105T). Les mêmes thermocouples sont utilisés pour mesurer la température de l'air dans quatre parcelles débroussaillées et dans quatre parcelles non débroussaillées. Ces derniers thermocouples sont installés à 30 cm au-dessus du sol, dans des abris météorologiques. Dans chaque parcelle, le potentiel d'humidité du sol est mesuré à l'aide d'un bloc de gypse Delmhorst (Campbell Scientific, modèle 223) placé à 10 cm dans le sol minéral. L'humidité relative (RH) est mesurée à l'aide d'une sonde d'humidité relative (Campbell Scientific, modèle 207), dans une parcelle débroussaillée et dans une parcelle non débroussaillée; ces capteurs peuvent aussi mesurer la température de l'air. Les capteurs d'humidité relative sont placés à 30 cm au-dessus du sol, dans des abris similaires à ceux utilisés pour les capteurs de température de l'air. Six capteurs quantiques (Li-Cor, modèle LI190SB) sont sélectionnés pour le contrôle de l'effet de divers niveaux de compétition végétale sur le rayonnement photosynthétiquement utilisable (RPU) incident. Cinq de ces capteurs sont placés à 30 cm de hauteur dans des parcelles ayant différents niveaux de compétition des broussailles et le sixième (le témoin) est installé à 180 cm de hauteur dans une parcelle débroussaillée. Ces capteurs mesurent indirectement la quantité de lumière

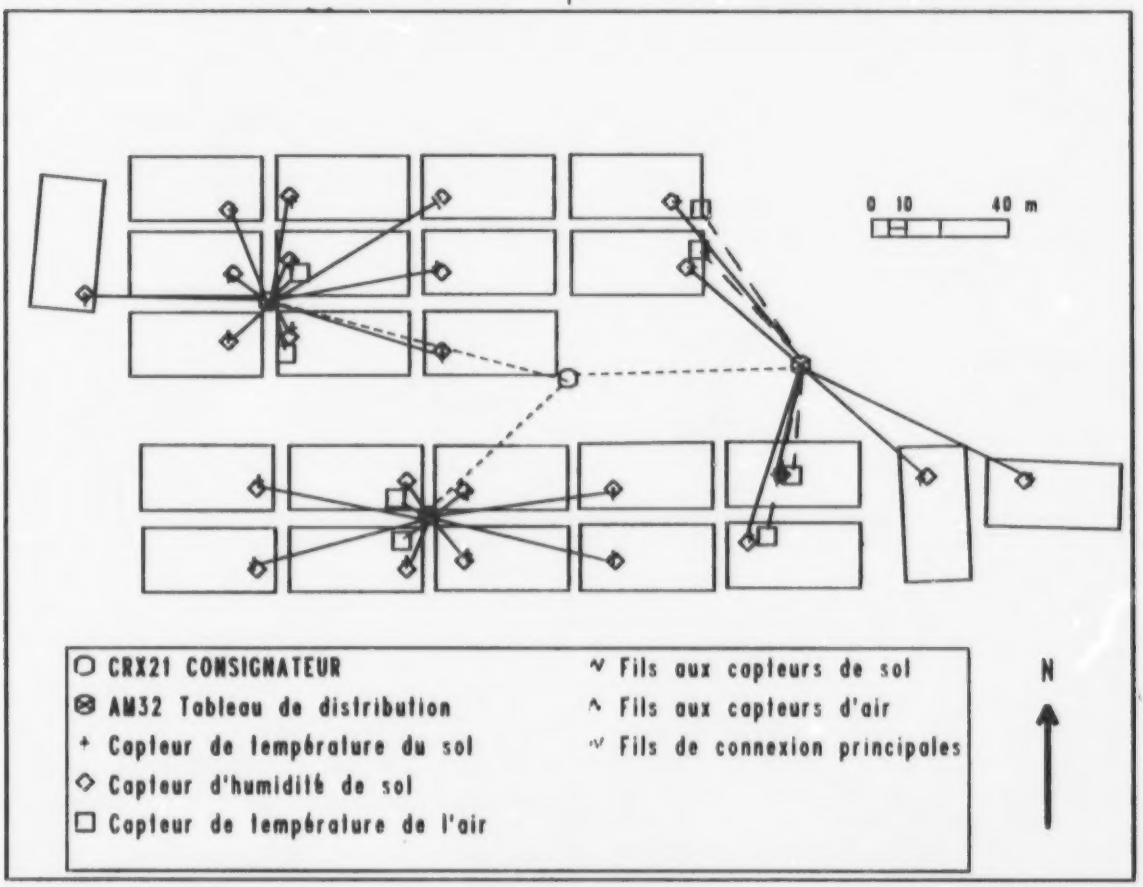


Figure 6. Emplacements du matériel de contrôle et des capteurs sur le site expérimental du lac Cartier

reçue par chaque arbre échantillon. Pour ce faire, on détermine d'abord un indice quantifié de compétition végétale autour de chaque capteur de lumière et l'on compare ensuite les indices à la quantité de lumière réellement interceptée (cf Brand, 1986). On établit ensuite des équations de régression qui lient le RPU incident à l'indice de compétition mesuré autour des capteurs de lumière. Plus tard, lorsqu'on a déterminé les indices de compétition autour de chaque arbre échantillon, on peut utiliser les mêmes équations pour estimer la quantité de RPU reçue par chaque arbre pendant toute la saison de croissance.

Les capteurs d'humidité relative et les capteurs quantiques sont reliés directement au consignateur de données alors que les autres capteurs sont connectés à trois multiplexeurs (Campbell Scientific, modèle Am 32). On doit connecter directement les capteurs d'humidité relative et de RPU au consignateur de données sinon il est impossible de contrôler plus de deux ou trois types de capteurs différents à partir d'un multiplexeur donné (B. Day, comm. pers. Campbell Scientific, Chatham, Ont.).

L'annexe 2 contient un résumé des éléments du système de consignation des données utilisé sur le site expérimental du lac Cartier.

D. Gestion des données

Le consignateur de données Campbell Scientific 21X est placé en un point central par rapport aux blocs 2 et 3 de la plantation qui contiennent les capteurs. Il est installé dans un petit abri et alimenté par deux batteries rechargeables de 12 volts du type de celles utilisées sur les bateaux ou sur les véhicules de plaisance.

Les mesures des capteurs sont prélevées toutes les 5 min (intervalle d'échantillonnage) et les moyennes sont calculées par le consignateur de données toutes les 2 h, à l'heure. Au début de la première saison (1986), on utilise un intervalle d'échantillonnage de 10 s pour tous les capteurs, ce qui amène un épuisement rapide des batteries au point de perdre les données de plusieurs jours. Cette fréquence d'échantillonnage peut aussi entraîner une usure superflue des mécanismes de relais qui se trouvent dans chaque multiplexeur. Par la suite, on utilise un intervalle d'échantillonnage de 5 min qui, après analyse des données, donne des résultats plus que satisfaisants.

On peut conserver jusqu'à 16 jours de données de faible précision (4 caractères) provenant de ce site dans la mémoire de 40K du consignateur de données avant qu'il soit nécessaire d'effectuer un transfert sur bande magnétique. Toutefois, en raison de l'éloignement du 21X (environ 15 km de l'Institut), il faut accroître la capacité de stockage des données. Un magnétophone à cassette (Tandy, modèle CCR-82) nous permet un téléchargement moins fréquent. Une cassette de 60 min peut garder en mémoire jusqu'à 90 000 points de données (données de 80 jours). Le système est configuré de façon que les données soient transférées du 21X au magnétophone après que 512 points de données aient été introduits dans la mémoire finale du consignateur de données. Le transfert des données sur la cassette a lieu environ toutes les 11,25 heures.

Pour apporter une protection supplémentaire en cas de températures inférieures au point de congélation (lorsque le magnétophone n'est plus fiable) et pour dépanner en cas de défaillance du magnétophone, un module de stockage des données à semi-conducteurs (Campbell Scientific, modèle SM64), capable de stocker jusqu'à 32 768 points de données (29 jours), est aussi branché sur le consignateur de données.

Le téléchargement des données se fait toutes les deux semaines, dans la mesure du possible. A ce moment-là, les données sont transférées du module de stockage sur l'autre face de la cassette. Ainsi, lorsqu'on examine les bandes magnétiques obtenues à la fin de la saison, les données enregistrées à la fois par le magnétophone et par le module de stockage pendant une période déterminée peuvent être étudiées à l'aide de la même cassette. Lors de la première saison, les données sont transférées dans les fichiers de notre mini-ordinateur VAX. Pour ce faire, nous installons une carte de lecture de bande magnétique (Campbell Scientific, modèle PC 201) dans un IBM PC-AT et nous utilisons le progiciel de micro-ordinateur SMART-TERM. Par la suite, nous utilisons l'interface à cassette (Campbell Scientific, modèle C20) pour transférer les données dans un micro-ordinateur et, de là, dans le mini-ordinateur VAX.

Bien que deux semaines constituent l'intervalle maximal recommandé pour le téléchargement, nous vérifions le fonctionnement du consignateur de données à chaque visite de la plantation. Il est aussi recommandé de faire des visites plus fréquentes lorsque les conditions météorologiques sont inclémentes (par ex., en cas d'orage). Toutes les observations sont inscrites dans un carnet de bord lors de chaque visite. Les données suivantes doivent être relevées : dates et heures auxquelles le système s'est arrêté (pas d'affichage sur l'écran), modifications de la programmation au cours de la saison, indications des capteurs suspects, tension de la batterie, signatures du programme (ces valeurs changent seulement lorsque le programme a été modifié ou altéré), indication du compteur de la cassette (nécessaire pour déterminer si la bande a avancé depuis la dernière visite), date et heure du téléchargement des données.

E. Protection du système

Le consignateur de données est placé dans un abri afin de le protéger contre le vandalisme et les intempéries et aussi afin de permettre aux utilisateurs du système d'effectuer les inspections régulières et les changements de programmation dans un comfort raisonnable. L'abri est bien ventilé afin de réduire les risques de dommages dus à des températures élevées. Le consignateur de données est protégé des décharges orageuses par un câble de gros calibre connecté à une tige de mise à la terre extérieure. Bien que le consignateur de données soit équipé d'éclateurs, nous ajoutons une boîte de dérivation (Campbell Scientific, modèle 038) pour plus de sécurité.

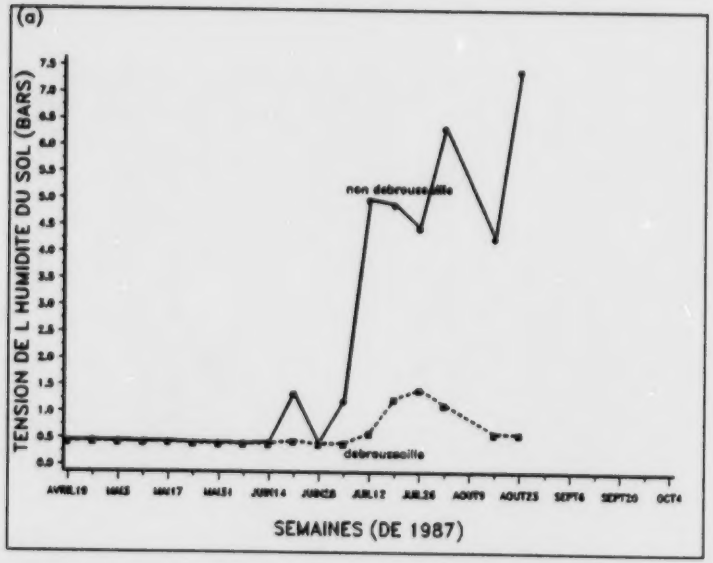
Afin de réduire les fluctuations de température dans les gaines des multiplexeurs (fournies par le fabricant), ces dernières sont placées dans des boîtes en bois isolées avec du styrofoam installées à 15 cm au-dessus du sol. Du silicone est posé autour des câbles sortant des gaines pour empêcher toute infiltration d'humidité. Il faut aussi placer les boîtes dans de grands abris en bois bien ventilés pour les protéger des animaux. Les boîtes des multiplexeurs étant équipées de colliers de serrage à vis, il n'est donc pas nécessaire de poser des cadenas sur les abris extérieurs.

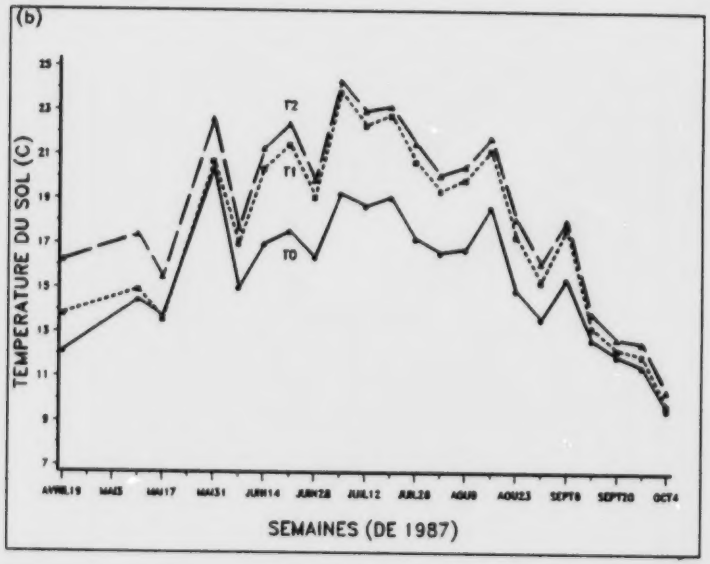
Tous les câbles menant aux capteurs sont enterrés à une profondeur de 5 à 10 cm afin de les protéger contre les rongeurs ou contre les dommages causés par inadvertance lors, par exemple, d'excursions pédestres ou d'opérations de débroussaillage dans ces parcelles. Les sondes d'humidité relative et les capteurs quantiques relativement coûteux sont enlevés à la fin de la saison, afin de les protéger de l'hiver et du vandalisme, et, dans le cas des capteurs quantiques, afin de permettre le réétalonnage biennal. Il est impossible de retirer tous les câbles (enterrés) connectés à chaque capteur, aussi coupons-nous les câbles à proximité des capteurs. Au début de chaque saison, nous posons des connecteurs de câble réutilisables. La durée de vie des thermocouples sur le terrain est estimée à 10 ans et l'on ne touche plus aux thermocouples une fois qu'ils sont installés.

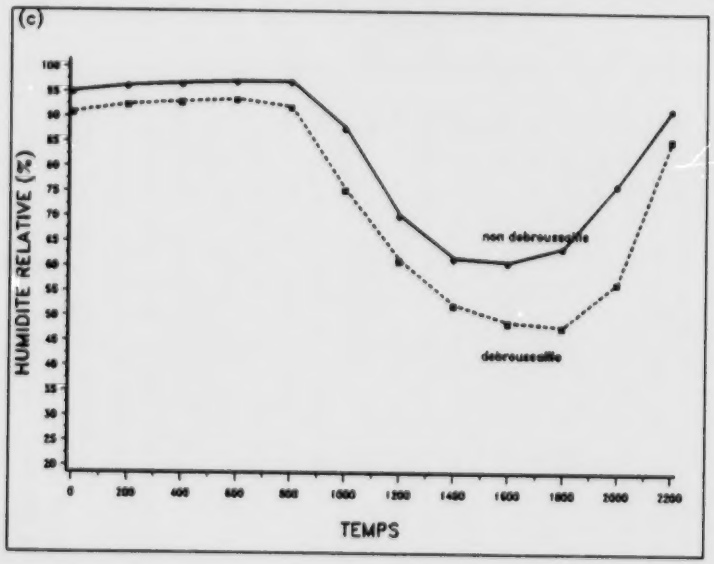
F. Récupération des données et problèmes

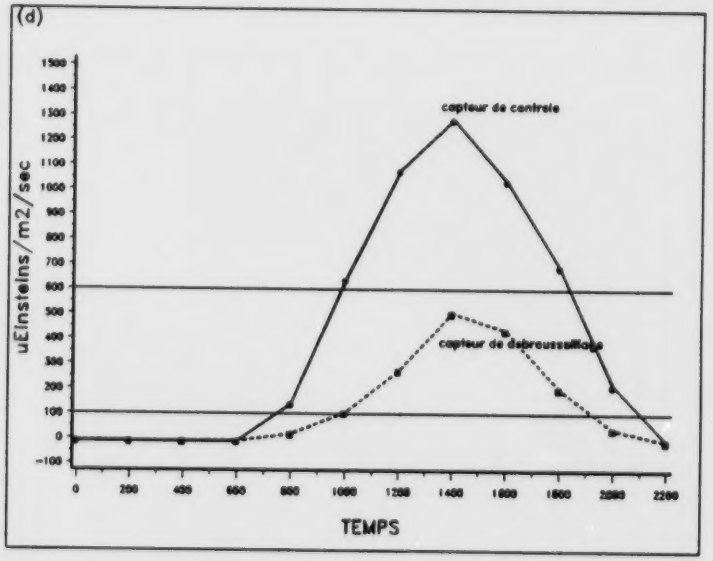
Si l'on en juge d'après les résultats obtenus lors de deux saisons de croissance, ce système de consignation des données fonctionne bien comme prévu. Les résumés sous forme de tableaux et de graphiques obtenus à l'aide des logiciels SAS et SAS/GRAPH à partir de ces données respectent la majeure partie des principes de biophysique. Les figures 7a à 7d donnent des exemples de graphiques produits par le système de consignation de données du lac Cartier pour l'humidité du sol, la température du sol, l'humidité relative et le RPU.

Le taux de récupération des données estimé en termes de nombre de lignes de données enregistrées comparé au nombre total possible, est de 87,6 % en 1986 et de 84,4% en 1987. La perte de données est attribuée à des facteurs extérieurs, non à des défaillances du système. La plupart du temps, des décharges orageuses à proximité du site expérimental sont à l'origine des arrêts du système. Si l'on compare ce consignateur de données avec deux systèmes similaires plus petits installés à Foleyet (Ont.) et à Prince George (C.-B.), il semble qu'en accroissant la surface couverte par les capteurs reliés au consignateur de données, on augmente de façon exponentielle les temps d'arrêt du système dus aux décharges orageuses. Comparés au site du lac Cartier, les deux autres sites couvrent des surfaces environ moitié moins grandes (1 ha contre 2 ha) et comptent 48 capteurs (contre 88 à Lac Cartier). En 1987, aucun arrêt du système n'est attribué aux décharges orageuses sur ces deux autres sites. Par contre, au lac Cartier,









Figures 7a-d. Site du lac Cartier, IFNP – a) Force de rétention de l'eau du sol hebdomadaire pour deux niveaux de débroussaillement; b) Températures du sol moyennes hebdomadaires à 10 cm de profondeur pour trois niveaux de préparation du site; c) HR moyenne horaire en août 1987; d) RPU moyen horaire en août 1987.

le consignateur de données s'arrête cinq fois, immédiatement après des orages.

Par chance, aucun élément du système de consignation de données n'est endommagé par ces orages au cours de ces deux années, grâce aux éclateurs et à la prise de terre. De toute évidence, il se peut que certains facteurs, tels que le terrain et les conditions météorologiques locales, rendent la région propice aux décharges orageuses, mais les risques peuvent aussi être associés à la grande surface couverte et au nombre de capteurs. Nous recommandons aux chercheurs qui envisagent des expériences de cette ampleur de chercher à réduire au minimum la longueur des câbles connectés aux capteurs en installant des multiplexeurs en des points judicieusement choisis ou en utilisant plus d'un consignateur de données. Il convient de se rappeler que les longs câbles coûtent cher et que les coûts des consignateurs de données ou des multiplexeurs supplémentaires peuvent être compensés par les économies réalisées sur les câbles. Enfin, tous les appareils doivent être correctement mis à la terre et des boîtes de dérivation, protégées par des éclateurs, doivent être installées entre les capteurs et les consignateurs de données.

Une tension inadéquate de la batterie constitue le seul autre facteur qui provoque une panne complète du système. Toutefois, cela se produit seulement une fois et nous pouvons remédier au problème en augmentant l'intervalle d'échantillonnage de 10 s à 5 min et en installant deux batteries robustes de véhicules de plaisance en parallèle. Cette dernière mesure nous permet d'enlever une batterie pour la recharger sans avoir à interrompre le consignateur de données. Un seul rechargement est nécessaire pendant la saison 1987.

Le plus souvent, les mauvaises indications des capteurs sont dues à des erreurs dans le programme original lorsqu'il est réintroduit (après des orages, par exemple) ou modifié. Une fois un programme satisfaisant mis au point, il est possible de vérifier s'il est introduit ou réintroduit correctement en vérifiant la signature du programme dans la mémoire initiale du consignateur de données; cette valeur est unique pour un ensemble donné d'instructions du programme.

Il arrive que les capteurs fournissent des indications incorrectes pour d'autres raisons, relativement peu fréquentes : câbles de connexion endommagés lors du débroussaillage parce qu'ils sont mal enterrés; mauvaises connexions avec les multiplexeurs, les boîtes de dérivation ou le consignateur de données; résistances grillées dans les blocs de gypse, à la suite de pointes de courant pendant des orages; vandalisme. Suite à plusieurs expériences, incluant celle-là, nous avons préparé un guide de dépannage (disponible auprès de l'auteur) pour vérifier ce système de consignation de données.

Conclusion

En recherche forestière, on étudie souvent les différences dans les conditions environnementales entre plusieurs sites ou entre des sites soumis à des traitements différents. Jusqu'à récemment, le contrôle environnemental systématique de variables autres que les plus fondamentales était difficile et prenait beaucoup de temps. Les consignateurs de données facilitent considérablement ce type de contrôle et devraient permettre de mieux comprendre les aspects environnementaux de la productivité forestière. L'étude de cas présentée porte sur le contrôle continu de 88 capteurs en tant que partie intégrante du dispositif expérimental. Cette expérience fournit des données sur la croissance des arbres en fonction de changements quantifiés dans les conditions environnementales. Les expériences de ce type fournissent des données plus généralement utilisables que celles dans lesquelles on étudie des traitements non quantifiés du point de vue environnemental. Elles permettront ainsi d'établir des critères plus rationnels pour la conception de programmes de reboisement.

Remerciements

Nous sommes infiniment reconnaissants à R. Silversides, J. Harrington et W.L. Clink qui ont bien voulu revoir le présent rapport. Nous remercions également P. Litwin et C. Robinson pour leurs suggestions constructives. Enfin, nous désirons souligner l'aide que nous ont apportée S. Handke, E. Leskie et E. Andersen dans divers domaines.

Références

American Society for Testing and Materials (ASTM). 1981. Manual on the use of thermocouples in temperature measurement. ASTM Special Technical Publication 470B. Philadelphia, Pa.

Anon. 1985. LI-190SZ quantum sensor instruction manual. Publ. No. 8511-52. Li-Cor Inc., Lincoln, Neb.

Boyer, J.S. 1987. Thermocouple psychrometry in plant research. Pages 25-35 *in* International Conf. on Measurement of Soil and Plant Water Status, Vol. 3. Utah State Univ., July 6-10, 1987.

Brand, D.G. 1986. A competition index for predicting the vigour of planted Douglas-fir in southwestern British Columbia. Can. J. For. Res. 16:23-29.

Brand, D.G. 1988. Growth analysis of the response of white spruce and white pine to soil temperature, nutrition, and brush control. For. Ecol. Manage. (Sous presse)

Brand, D.G.; Janas, P.S. 1988. Growth and acclimation of planted white pine and white spruce seedlings in response to environmental conditions. Can. J. For. Res. 18:320-329.

Briscoe, R.D. 1984. Thermocouple psychrometers for water potential measurement. *In* Proc. Advanced Agricultural Instrumentation Seminar, NATO Advanced Study Institute, Ciocco, Italy, May 27-June 9, 1984.

Brown, R.W.; Chambers, J.C. 1987. Measurement of *in situ* water potential with thermocouple psychrometers: a critical evaluation. Pages 125-36 *in* International Conf. Measurement of Soil and Plant Water Status, Vol. 1. Utah State Univ., July 6-10, 1987.

Campbell, G.S. 1987. Overview: soil water potential measurement. Pages 115-18 *in* International Conf. Measurement of Soil and Plant Water Status, Vol. 1. Utah State Univ., July 6-10, 1987.

Carlson, T.N.; Salem, J.E. 1987. Measurement of soil moisture using gypsum blocks. Pages 193-99 *in* International Conf. Measurement of Soil and Plant Water Status, Vol. 1. Utah State Univ., July 6-10, 1987.

Doebelin, E.O. 1966. Measurement systems: application and design. McGraw-Hill Book Company, New York, NY.

Federer, C.A.; Tanner, C.B. 1966. Sensors for measuring light available for photosynthesis. Ecology 47:654-57.

Fritschen, L.J.; Gay, L.W. 1979. Environmental instrumentation. Springer-Verlag, New York, NY.

Ingestad, T.; Aronsson, A.; Ågren, G.I. 1981. Nutrient flux density model of mineral nutrition in conifer ecosystems. Studia For. Suecica 160:61-71.

International Symposium on Moisture and Humidity. 1985. Moisture and humidity measurement and control in science and industry, Washington, D.C. Instrument Soc. Amer., Research Triangle Park, N.C.

Klebs, G. 1913. Über das Verhaltniss der dussenwelt zur Entwicklung der Pflanzen. Sitzunsber. Heidelb. Akad. Wiss., Abt. B 5, 1-47.

Lee, R. 1978. Forest microclimatology. Columbia University Press, New York.

Levitt, J. 1972. Responses of plants to environmental stresses. Academic Press, N.Y.

Mason, H.L.; Langenheim, J.A. 1957. Language analysis and the concept environment. Ecology 38:325-340.

Monteith, J.L. 1972. Survey of instruments for micrometeorology. IBP Handbook No. 22 Blackwell Scientific Publications, London.

Muller, S.H.; Beekman, P.J. 1987. A test of commercial humidity sensors for use at automatic weather stations. J. Atmos. Oceanic Tech. 4:731-735.

Schooley, J.F. 1986. Thermometry. CRC Press Inc., Boca Raton, Fla.

Sellers, W.D. 1965. Physical climatology. Univ. Chicago Press, Chicago, Ill.

Spomer, G.G. 1973. The concept of "interaction" and "operational environment in environmental analyses. Ecology 54:200-204.

Tanner, C.B. 1963. Basic instrumentation and measurements for plant environment and micrometeorology. Dept. Soils Bull. 6, Univ. Wisconsin, Madison, Wis.

Unwin, D.M. 1980. Microclimate measurement for ecologists. Academic Press, London.

Wang, J.Y.; Felton, C.M.M. 1983. Instruments for physical environmental measurements. Vol. 1. (2nd ed.) Kendall/Hant Publishing Company, Dubuque, Iowa.

World Meteorological Organization. 1983. Guide to meteorological instruments and methods of observation. WMO No. 8., Geneva, Switz.

Annexe I: Liste des fabricants de consignateurs de données en Amérique du Nord

Entreprise	Adresse	Produits
Aanderaa DC Instruments	560 Alpha St. Victoria, B.C. V8Z 1B2 Tél.: 604-386-7783	
A.I.R. Inc.	1880 S. Flatiron Court Boulder, Co. 80381 Tél.: 303-443-7187	Airsonde Tethersonde
Allen-Bradley	135 Dundas St. Cambridge, Ont. N1R 5X1	Datamyte Carnet électronique
Campbell Scientific Inc.	(Administration centrale) P.O. Box 551 Logan, Utah 84321 Tél.: 801-753-2342 Télex: 453058 (Canada):	Système de mesure et de commande CR7X Système de mesure et de commande CR10 Micrologger™21X
Campbell Scientific Inc.	7525-41 Ave. Edmonton, Alberta T6E 5X7 Tél.: 403-434-9421 Télex: 037-2966 EDM ou 192 Ste. Claire St. Chatham, Ont. N7L 3J6	
Climatronics Corp.	140 Wilbur Place Airport International Plaza Bohemia, NY 11716 Tél.: 516-567-7300	
Data Metric - Dresser Industries Inc.	340 Fordham Road Walmington, Mass. 01887 U.S.A.	Portatif: 100VT- lecture directe Appareils de mesure de l'air, de la vitesse de l'eau et de la température
Electronic Controls Design	13626 South Freeman Road Marlino, Ore. 97042-9639 U.S.A.	Consignateurs de données 10-40 canaux CA-CC
Forest Technology Systems Ltd.	841 Goldstream Ave. Victoria, B.C. V9B 2X8	Thermaloggers FTS 6100 Station de forêt-météo

Entreprise	Adresse	Produits
Geneq Inc.	223 Signet Drive Weston, Ont. M9L 1V1	Consignateurs de données portatifs Appareil de terrain Easy-Logger -12 canaux Omnidata Polycorder - 10 canaux DataMac- collecteur de données (carnet électronique)
Handar	1380 Borregas Ave. Sunnyoak, Ca. 94089-1094 Tél.: 408-734-9640	Système d'acquisition de données Hydromet 570A Plate-forme de collecte de données polyvalente- commandée par satellite ou télécommandée
Honeywell Ltd.	740 Ellesmere Road Scarborough, Ont. M1P 2V9 Tél.: 416-293-8111	Consignateur de données «Omnilight» 8M36 CA 4 canaux 12VCC disponible au deuxième trimestre 1988
Li-Cor Inc.	Box 4425 Lincoln, Neb. 68504 Tél.: 402-467-3576 Télex: 910-621-8116	Consignateur de données .LT-1200S (enregistreur d'ensemble de données minimal)
Metrodata Systems Inc.	Box 1307 Norman, Okla. 73069 Tél.: 405-329-7007	
Metrosonics Inc.	P.O. Box 23075 Rochester, NY 14692 U.S.A.	Consignateur de données dP-721- 8 canaux CA-CC portatif
Multitest Electronics Inc.	148 Colonnade Rd., Ste. 208 Nepean, Ont. K2E 7J5	Consignateur de données portatif DDL 4000 & 4020 CA et batterie 12V 16 ANALOG 4 canaux de contact SW
Omnidata International Inc.	P.O. Box 3489 Logan, Utah 84321 Tél.: 801-753-7760 (Canada): Geneq Inc., 223 Signet Drive Weston, Ont. M9L 1V1 Tél.: 416-747-9889	Système EasyLogger™ Datapod™

Entreprise	Adresse	Produits
Wescor Inc.	459 South Main St. Logan, Utah 84321 Tél.: 801-752-6011 Télex: 4930393 WESC UI (Canada): Geneq Inc., 223 Signet Drive Weston, Ont. M9L 1V1 Tél.: 416-747-9889	DeltaLogger™

Annexe 2: Éléments du système de consignation des données utilisé dans la plantation expérimentale du lac Cartier

Fournisseur	Élément	Quantité	Coût ($ 1986)
Campbell Scientific Canada Corp., Edmonton (Alb.)	Micrologger™21X	1	3700
	Module de stockage SM64	1	1230
	Carte de lecture de bande PC201 et logiciel IBM	1	1040
	Multiplexeurs AM32 (prolongateurs de cartes)	3	4000
	Blocs de gypse (modèle 223)	24	340
	Thermocouples (105T)	56	2190
	Capteurs quantiques Li-Cor (LI190SB)	6	3900
	Supports pour les capteurs quantiques	6	576
	Enregistreurs à cassette (Tandy CCR-82)	2	300
	Sondes d'humidité relative (207)	2	790*
	Boîte de dérivation (038)	1	570*
	Interface à cassette à écriture seulement (SC92)	1	125
	Câblage pour les multiplexeurs	3	180

* achetés en 1987